



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 543:543.38:543.054:537.622

doi: 10.17308/sorpchrom.2023.23/11000

Сорбция ноотропов из водных сред активным углем Norit® PK 1-3

Алексей Алексеевич Кушнир¹, Александр Сергеевич Губин¹,

Павел Тихонович Суханов¹✉, Ксения Олеговна Сизо¹

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия,

pavel.suhanov@mail.ru[✉]

Аннотация. В последнее время возрастают количество фармацевтических отходов, загрязненность поверхностных и грунтовых вод лекарственными препаратами и, как следствие, увеличивается токсикологический риск для живых организмов. Активные угли являются распространенными сорбентами для извлечения из вод загрязнителей различного происхождения, в том числе органических.

С применением активного угля торговой марки Norit PK 1-3, получаемого на основе торфа, изучена сорбция ноотропов (НТ) – фармакологической группы корректоров нарушений мозгового кровообращения, синтетического и природного происхождения – винпоцетина (ВП), циннаризина (ЦН), гамма-аминомасляной (ГАМК) и никотиновой (НК) кислот.

При массе сорбента 0.10 г, объеме раствора 100 см³, времени контакта фаз – 1 ч степень извлечения НТ составляет 52-95%, предельная сорбция – 7.8-72.5 мг/г. Степень извлечения зависит от pH и для НК она максимальна в интервале от 5 до 11, ВП и ЦН от 7 до 13. ГАМК максимально извлекается при pH 7. Влияние pH на эффективность извлечения обусловлено притяжением противоположных зарядов между поверхностью сорбента и диссоциированной формой НТ. Кинетика сорбции описывается моделью псевдо-второго порядка, изотермы сорбции (I тип) – моделью Ленгмюра.

Установлено, что сорбция зависит от природы сорбата – кислотности, параметра гидрофобности, площади полярной поверхности молекулы, содержания различных форм сорбата в растворе [рассчитаны с помощью программы MarvinSketch вер. 22.6 (Chemaxon)] и заряда поверхности сорбента. Для НТ помимо гидрофобных взаимодействий характерны, π-стэкинг и диполь-дипольные взаимодействия.

Ключевые слова: сорбция, лекарственные препараты, ноотропы, активный уголь, винпоцетин, циннаризин, гамма-аминомасляная кислота, никотиновая кислота.

Для цитирования: Кушнир А.А., Губин А.С., Суханов П.Т., Сизо К.О. Сорбция ноотропов из водных сред активным углем Norit® PK 1-3 // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2023. Т. 23, № 1. С. 129-137. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11000>

Original article

Sorption of nootropics from aqueous media with activated carbon Norit® PK 1-3

Aleksei A. Kushnir¹, Alexander S. Gubin¹, Pavel T. Sukhanov¹✉, Kseniya O. Sizo¹

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia, pavel.suhanov@mail.ru[✉]

Abstract. Recently, the amount of pharmaceutical waste and the contamination of surface and ground waters with drugs built up and, as a result, the toxicological risk for living organisms has increased. Activated carbons are common sorbents for extracting pollutants of various origins from waters, including organic pollutants.



With the use of Norit PK 1-3 active carbon, derived from peat, the sorption of nootropics (NT) - a pharmacological group of correctors of cerebral circulation disorders, of synthetic and natural origin - vinpocetine (VP), cinnarizine (CN), gamma-aminobutyric (GABA) and nicotinic (NA) acids was investigated.

With a sorbent weight of 0.10 g, a solution volume of 100 ml, and a phase contact time of 1 h, the degree of NT extraction was 52-95%, and the maximum adsorption capacity was 7.8-72.5 mg/g. The degree of extraction depends on pH and for NA it is maximal in the range from 5 to 11, for VP and CN it is maximal in the range from 7 to 13. GABA is maximally extracted at pH 7. The effect of pH on the extraction efficiency is due to the attraction of opposite charges between the surface of the sorbent and the dissociated form of NT. The sorption kinetics is described by a pseudo-second order model, sorption isotherms (type I) are described by the Langmuir model.

It has been established that sorption depends on the nature of the sorbate – acidity, hydrophobic parameter, the polar surface area of the molecule, the content of various forms of the sorbate in solution [calculated using the MarvinSketch ver. 22.6 (Chemaxon) program] and the charge of the sorbent surface. In addition to hydrophobic interactions, NT are characterized by π -stacking and dipole-dipole interactions.

Keywords: sorption, drugs, nootropics, activated charcoal, vinpocetine, cinnarizine, gamma-aminobutyric acid, nicotinic acid.

Acknowledgments: the study received financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of State Contract with universities regarding scientific research in 2020-2022, project no. FZGU-2020-0044.

For citation: Kushnir A.A., Gubin A.S., Sukhanov P.T., Sizo K.O. Sorption of nootropics from aqueous media with activated carbon Norit® PK 1-3. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2023. 23(1): 129-137. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11000>

Введение

В последнее время самолечение (комплексная терапия) и неправильная утилизация лекарственных препаратов привела к увеличению фармацевтических отходов и загрязнению поверхностных и грунтовых вод и, как следствие, – к возросшему токсикологическому риску для живых организмов. Накопление препаратов и их метаболитов происходит до тех пор, пока не достигнет биологически активной концентрации в печени, почках и в дальнейшем происходят необратимые повреждения этих органов [1, 2]. Компоненты лекарственных форм и средства личной гигиены считаются новой группой загрязнителей и присутствуют в водах по всему миру [3].

Многие фармацевтические препараты разработаны как относительно стабильные соединения, например, ноотропы (НТ) – фармакологическая группа корректоров нарушений мозгового кровообращения, увеличивающие умственные возможности (память, мотивацию, концентрацию, внимание), синтетического и природного происхождения [4]. Они только отчасти метаболизируются в организме и после приема поступают в стоки.

Фармацевтическая продукция лишь частично извлекается при обработке сточных вод биodeградацией, сорбцией или окислением (хлорирование, озонирование). При озонировании, хлорировании азотосодержащие вещества способны образовывать более токсичные продукты, которые не только трудно деградируют, но и обладают бактерицидными свойствами, тем самым, попадая на очистные сооружения, они приводят к гибели микроорганизмов активного ила [5].

Активный уголь (АУ) много десятилетий является распространенным сорбентом для извлечения из вод загрязнителей различного происхождения, в том числе органических. Его сорбционная активность обусловлена развитой пористой структурой (большие объемы пор, высокая удельная площадь поверхности, $S_{уд}$) и различными химическими свойствами поверхности, обусловленными наличием или отсутствием гетероатомов на краях графитовой плоскости [6, 7].

Цель работы – изучить сорбционную способность и установить оптимальные параметры сорбции коммерческого АУ Norit PK 1-3 по отношению к НТ: винпocетину (ВП), циннаризину (ЦН), гамма-



аминомасляной (ГАМК) и никотиновой (НК) кислотам.

Экспериментальная часть

Приборы, реактивы и материалы. При проведении эксперимента применяли ВП, ЦН, НК, ГАМК производства Merck (Darmstadt, Germany). В работе использовали деионизированную воду (CAS 7732-18-5, ELCCOM, РФ), растворы НТ подкисляли хлористоводородной кислотой или подщелачивали гидроксидом натрия (ГОСТ 14261-77, Камская химическая компания, РФ). Для сорбции применяли АУ на основе торфа торговой марки Norit РК 1-3 (Sigma-Aldrich).

Изучение сорбции НТ в статических условиях. Навеску сорбентов (0.10 г) помещали в термостатируемые сосуды, добавляли 100 см³ (*V*) раствора исследуемого вещества с начальной концентрацией 0.01 мг/см³ (*C*₀) и перемешивали до установления сорбционного равновесия при (22±1°C). Далее сорбент отделяли фильтрованием («Синяя лента» (ЗАО «СоюзХимПром», Воронеж) и измеряли оптическую плотность каждого раствора на спектрофотометре Shimadzu UV mini-1240 при соответствующих длинах волн (ВП – 222, ЦН – 200, НК, ГАМК – 261 нм).

Изучение влияния pH и времени достижения сорбционного равновесия. В интервале 1-13 изучали влияние pH на сорбцию: навеску АУ массой 0.05 г помещали в 100.0 см³ раствора сорбата с известной концентрацией и перемешивали 1 ч. Далее сорбент отделяли от раствора фильтрованием.

Для оценки влияния времени на сорбцию в статических условиях 0.10 г сорбента помещали в 100.0 см³ стандартного раствора сорбата и перемешивали 2-90 мин, сорбент отделяли от раствора фильтрованием. Концентрацию НТ после сорбции определяли спектрофотометрически.

Физико-химические свойства НТ (табл. 1) – показатель кислотности (pK_a), параметр гидрофобности (logP), площадь полярной поверхности молекулы (S_m), содержание форм сорбата (N, %) и их структурные формы в зависимости от pH раствора рассчитывали с помощью программы MarvinSketch вер. 22.6 (Chemaxon).

Обсуждение результатов

Norit РК 1-3 на 88% состоит из углерода, содержит около 8.5% золы (минеральная составляющая). Функциональные группы АУ включают водород, кислород, азот и серу с массовым содержанием 0.54, 1.68, 0.88, 0.24% соответственно [8]. Одним из наиболее важных свойств при сорбции органических веществ АУ является π-стэкинг взаимодействия с ароматическими кольцами сорбатов [8]. Согласно теории кислот и оснований Льюиса, АУ можно считать основанием, поскольку он может отдавать π-электроны.

На извлечение сорбатов и их сорбцию на границах раздела вода - твердое вещество влияет pH раствора. При этом от pH раствора зависит заряд сорбата и поверхности сорбента. Поверхность Norit РК 1-3 может быть заряжена положительно

Таблица 1. Физико-химические свойства НТ (показатель кислотности, pK_a; параметр гидрофобности, logP; площадь полярной поверхности молекулы, S_m; степень извлечения, R).

Table 1. Physical and chemical properties of NT (acidity index, pK_a; hydrophobicity parameter, logP; the polar surface area of the molecule, S_m; extraction degree, R).

Сорбат	pK _a *	log P*	S _m , Å ² *	R*, %
ГАМК	10.6	-3.17	63.3	65
НК	4.75	0.36	50.2	95
ВП	6.68	4.10	34.5	82
ЦН	7.40	5.80	6.5	52

*степень извлечения НТ изучали здесь и далее (рис. 1, 4), при *m*=0.10 г, *V*=100 см³, *C*₀=0.01 мг/см³.

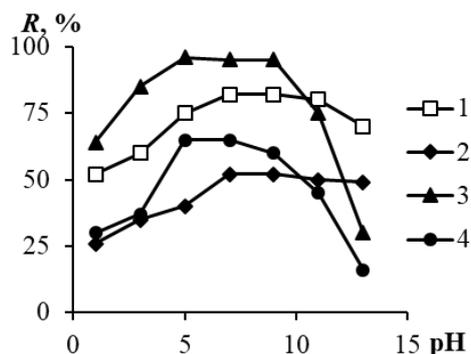


Рис. 1. Влияние pH на степень извлечения ВП (1), ЦН (2), НК (3), ГАМК (4) при сорбции сорбентом Norit PK 1-3.

Fig. 1. Influence of pH on the degree of extraction of VP (1), CN (2), NA (3), GABA (4) during sorption by the Norit PK 1-3 sorbent

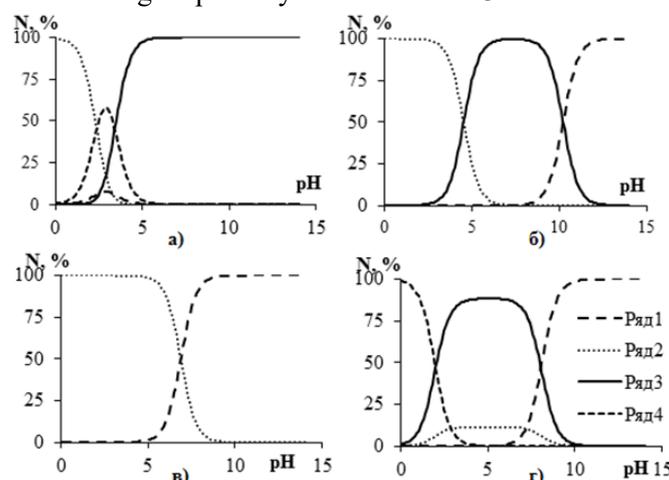
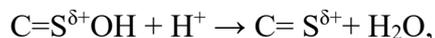


Рис. 2. Влияние pH на содержание форм (N, %) НК (а), ГАМК (б), ВП (в), ЦН (г) в растворе (ряды советуют формам вещества, структурные формулы приведены на рис. 3).

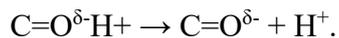
Fig. 2. Influence of pH on the content of forms (N, %) of NA (a), GABA (b), VP (c) and CN (d) in solution (the series correspond to the substance forms, the structural formulas are shown in Fig. 3)

или отрицательно, что определяется pH среды и обусловлено наличием гетероатомов (азот, кислород, сера [9]):

– положительно заряженная поверхность



– отрицательно заряженная поверхность



pH водной вытяжки исследуемого сорбента составляет 11.7 [9], поэтому часть АУ положительно заряжена при $pH < 11.7$ и отрицательно при $pH > 11.7$. Изучаемые сорбаты – слабые кислоты (pK_a НТ приведены в табл. 1), частично диссоции-

руют в водных растворах и их степень извлечения зависит от соотношения молекулярной или ионной формы в растворе.

Степень извлечения НК максимальна при pH 5-11 (рис. 1), когда кислота практически полностью (на 97-100%) находится в анионной форме (рис. 2а). Сорбция обусловлена взаимодействием противоположных зарядов между поверхностью сорбента и диссоциированной формой НК (рис. 3а). При pH 1-5 (помимо предпочтительной для сорбции анионной формы) НК присутствует в молекулярной (меньше 7%), катионной и в форме бипо-

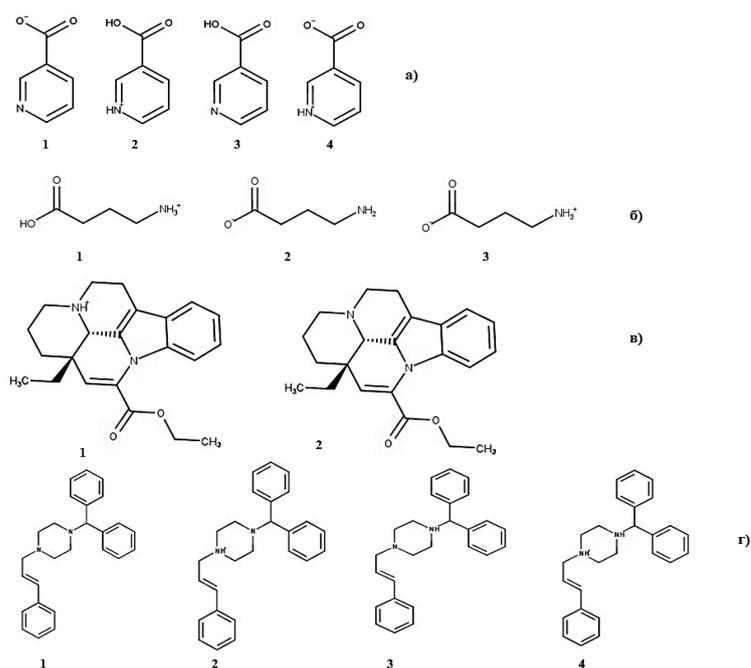


Рис. 3. Структурные формы НК (а), ГАМК (б), ВП (в), ЦН (г) в зависимости от рН раствора
 Fig. 3. Structural forms of NA (a), GABA (b), VP (c), CN (d) depending on the pH of the solution

лярного иона, содержащего амино- и карбоксильные группы. Положительный заряд у NH-группы уменьшает степень извлечения (примерно на 7-30%) – возникают силы отталкивания между NH-группой и положительно заряженной поверхностью сорбента.

Степень извлечения ГАМК снижается при рН 1-3 (рис. 1). В кислой среде 97-100% ГАМК (рис. 2б) находится в форме катионов (рис. 3б), что можно объяснить электростатическим отталкиванием молекул сорбента и сорбата, заряженных положительно. Возрастание рН с 3 до 9 уменьшает количество анионной формы и увеличивает содержание биполярного иона (рис. 3б). Степень извлечения максимальна при рН 7. При рН > 11 степень извлечения резко снижается, происходит отталкивание отрицательно заряженных групп сорбента и анионной формой ГАМК.

Влияние рН на извлечение ВП и ЦН идентично. Максимум извлечения достигается при рН 7-13, когда сорбаты находятся преимущественно в молекулярной форме (рис. 3 в,г). Эффективность сорб-

ции объясняется доминирующим взаимодействием между ароматическими кольцами сорбата и графеновыми кольцами поверхности АУ [10].

Время контакта фаз является фундаментальным параметром в любых процессах переноса, в т.ч. сорбции. Установлено (рис. 4), что степень извлечения НТ постепенно увеличивается в течение 5 мин до 31-76% и затем плавно возрастает до достижения равновесия (60 мин). Увеличение времени до 90 мин практически не влияет на степени извлечения НТ: на начальном этапе сорбции много свободных участков на АУ, склонных к быстрой сорбции НТ [11].

Для изучения кинетики процесса сорбции НТ (рис. 7) аппроксимировали зависимости скорости сорбции от времени контакта фаз с использованием моделей псевдо-первого (уравнение Лагергрена) и псевдо-второго порядков [12]. Рассчитанные кинетические параметры сорбции НТ на АУ приведены в табл. 2. Для подтверждения соответствия моделей и экспериментальных данных рассчитывался коэффициент P (%), соответствующий

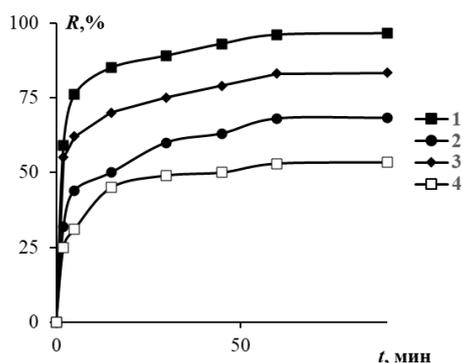


Рис. 4. Влияние времени контакта фаз на степень извлечения НК (1), ГАМК (2), ВП (3), ЦН (4) из водных сред сорбентом Norit PK 1-3

Fig. 4. Influence of phase contact time on the degree of extraction of NA (1), GABA (2), VP (3), CN (4) from aqueous media by the Norit PK 1-3 sorbent

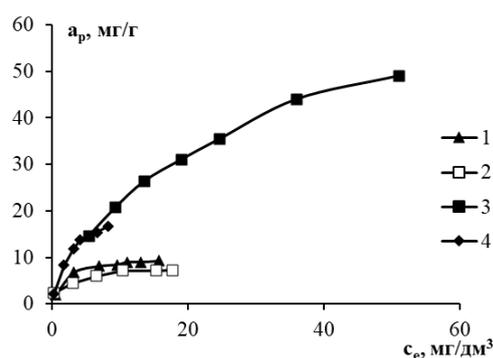


Рис. 5. Изотермы сорбции ГАМК (1), ЦН (2), НК (3), ВП (4) из водных сред сорбентом Norit PK 1-3.

Fig. 5. Sorption isotherms of GABA (1), CN (2), NA (3), VP (4) from aqueous media by the Norit PK 1-3 sorbent

Таблица 2. Параметры кинетических моделей сорбции НТ сорбентом Norit PK 1-3
 Table 2. Parameters of kinetic models of NT sorption by Norit PK 1-3 sorbent

Сорбат	Модель псевдо-первого порядка				Модель псевдо-второго порядка			
	K_1 (1/мин)	q_e (мг/г)	r^2	P , %	K_2 (г/мг мин)	q_e (мг/г)	r^2	P , %
НК	0.00091	3.43	0.9590	64.2	0.05564	9.75	0.9900	1.62
ГАМК	0.00092	4.23	0.9379	37.6	0.03546	7.03	0.9945	3.38
ЦН	0.00051	2.80	0.9517	47.2	0.05408	5.50	0.9986	3.77
ВП	0.00085	3.31	0.9414	60.7	0.05360	8.42	0.9975	0.21

разнице между экспериментальной и теоретической сорбционной емкостью. Сорбционные емкости, рассчитанные по модели псевдо-второго порядка, близки к экспериментальным (P 0.2-3.4%), при этом коэффициент аппроксимации r^2 более 0.99. Таким образом, процесс сорбции может осуществляться за счет обмена электронами между сорбатами и сорбентом путем химической (ковалентной) связи функциональных групп НТ с группами на поверхности Norit PK 1-3. Аналогичные результаты получены при изучении кинетики сорбции красителей на пористом АУ с высоким содержанием углерода (более 80%), полученным путем пиролиза отходов масличной пальмы и химической активации с использованием H_3PO_4 [13]. Кроме того, высокое значение r^2 модели псевдо-первого порядка (при времени контакта фаз 30 мин) позволяют сделать вывод о том, что некоторые

участки сорбента заняты физически, т.е. молекулы НТ задерживаются поверхностными или внутренними порами сорбента [14]. Следовательно, кинетика сорбции представляется комбинацией химического и физического процессов.

Изотермы сорбции НТ Norit PK 1-3 относятся к I типу по классификации IUPAC. Согласно классификации Чарльза Гильса они соответствуют L классу (изотермы Ленгмюра), то есть величина сорбции (q) возрастает с увеличением равновесной концентрации (C_p) и постепенно приближается к максимальной сорбционной ёмкости (a_p^{max}).

Для характеристики изотерм сорбции АУ наиболее часто используют модели Ленгмюра и Фрейндлиха, поскольку они позволяют охарактеризовать изучаемые процессы с различных позиций, а суммируя все результаты можно получить



Таблица 3. Параметры моделей Ленгмюра и Фрейндлиха при сорбции НТ сорбентом Norit РК 1-3

Table 3. Parameters of Langmuir and Freundlich models during NT sorption by the Norit PK 1-3 sorbent

Сорбат	Изотерма Ленгмюра			Изотерма Фрейндлиха		
	a_p^{\max} (мг/г)	K_L	r^2	$1/n$	K_f	r^2
НК	72.46	0.0424	0.9910	0.554	5.97	0.9950
ЦН	17.80	0.7359	0.9910	0.268	3.52	0.9860
ГАМК	10.39	0.5266	0.9980	0.494	3.12	0.9330
ВП	21.23	0.4209	0.9990	0.584	5.50	0.9810

наиболее полную информацию о протекании и механизме сорбции [15]. Наибольшие коэффициенты корреляции (r^2 0.991-0.999) установлены при представлении изотермы сорбции в координатах уравнения Ленгмюра, они применены для расчета a_p^{\max} и коэффициентов K_L .

Ленгмюровская сорбция обусловлена силами близкими к химическим, локализована и происходит на независимых активных центрах, т.е. на одном активном центре может сорбироваться одна молекула сорбата [16]. Это согласуется с предполагаемым механизмом электростатического взаимодействия между катионным центром АУ и анионными группами сорбатов.

Согласно модели Фрейндлиха параметр $1/n$ является мерой интенсивности сорбции или неоднородности поверхности, при этом n соответствует благоприятной сорбции, если $1 < n < 10$ [17]. Сорбция НТ на сорбенте Norit РК 1-3 благоприятна, так как $n=1.7-3.7$ (табл. 3), и уменьшается в ряду ГАМК \geq ЦН \geq НК \geq ВП

Высокое сродство ГАМК к сорбенту может быть обусловлено большей площадью молекулы по сравнению с другими НТ (табл. 1). Несмотря на меньшее значение площади молекулы ЦН, ее сродство к сорбенту больше, чем у НК и ВП, что может быть обусловлено сорбцией не только макро-, но и ультрамикрорами сорбента [8].

Однако ряд предельной сорбции не совпадает с приведенным рядом 1. Предельная сорбция уменьшается в ряду: НК

\geq ВП \geq ЦН \geq ГАМК (табл. 3). Такое различие может быть обусловлено различными механизмами сорбции. Повышенная основность Norit РК 1-3 обеспечивает большую делокализацию электронов базисной плоскости, π -стэкинг взаимодействиям с ароматическим кольцом НК (влияние рН на степень извлечения). С другой стороны, необходимо учитывать существование диполей на сорбате, так как они могут участвовать в специфических химических реакциях. Так азот, входящий в ароматическую структуру сорбента, во-первых, имеет тенденцию к удалению электронов ароматического кольца; во-вторых, – отрицательный заряд смещается в сторону кислорода в двойной связи карбоновой кислоты и, как следствие, могут образовываться дипольные взаимодействия. Кроме этого, высокой предельной сорбции НК способствует электростатическое взаимодействие сорбента с анионом сорбата.

Предельная сорбция ВП и ЦН выше, чем НК, что может быть обусловлено гидрофобными взаимодействиями. Менее растворимые в воде ВП и ЦН (параметры гидрофобности соответственно 4.1 и 5.8) сорбируются на углях лучше, так как АУ являются в основном гидрофобными и проявляют сильное сродство к органическим молекулам с ограниченной растворимостью [18]. Предельная сорбция ВП и ЦН примерно в 3.4-4.0 раза меньше по сравнению с сорбцией НК, что связано с тем что в растворе они присутствуют в молекулярной форме, поэтому для них характерно только гидрофобное и π -стэкинг взаимодействие. Сорбция

ГАМК минимальна и обусловлена только диполь-дипольными взаимодействиями.

Заключение

С применением активного угля торговой марки Norit PK 1-3 изучена сорбция ВП, ЦН, ГАМК и НК из водных сред. Установлено, что при массе сорбента равной 0.10 г, объеме раствора – 100 см³ и времени контакта фаз – 60 мин степень извлечения ноотропных препаратов составляет 52-95%, предельная сорбция составляет 7.8-72.5 мг/г. Сорбционные характеристики зависят от природы сорбата (кислотность, параметра гидрофобности,

площадь полярной поверхности молекул, содержание различных форм сорбата в растворе), заряда поверхности и структуры поверхности сорбента. Интерпретированы наиболее вероятные механизмы сорбции ноотропных препаратов. Сорбент может быть рекомендован для извлечения НТ из водных сред.

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. Gupta R., Sati B., Gupta A. Treatment and recycling of wastewater from pharmaceutical industry. Advances in biological treatment of industrial waste water and their recycling for a sustainable future. applied environmental science and engineering for a sustainable future. Springer, Singapore. 2019; 267-302. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1468-1_9
2. Riva F., Castiglioni S., Fattore E., Marenti A., Davoli E., Zuccato E. Monitoring emerging contaminants in the drinking water of Milan and assessment of the human risk, *Int. J. Hyg. Environ. Health.* 2018; 221: 451-457. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2018.01.008>
3. Gadipelly C., Pérez-González A., Yadav G., Ortiz I., Ibáñez R., Rathod V., Marathe K., Pharmaceutical industry wastewater: review of the technologies for water treatment and reuse, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2014; 53: 11571-11592. <https://doi.org/10.1021/ie501210j>
4. Kushnir A.A., Sukhanov P.T., Sizo K.O., Determination of nootropics in medicines, biological objects and food additives (review), *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya.* 2021; 1: 5-19. (In Russ.)
5. Postigo C., Richardson S.D. Transformation of pharmaceuticals during oxidation/disinfection processes in drinking water

treatment. *J. Hazard. Mater.* 2014; 279: 461-475. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.07.029>

6. Bingbing Q., Qianni S., Jicheng S., Chenhao Y., Huaqiang C., Application of biochar for the adsorption of organic pollutants from wastewater: Modification strategies, mechanisms and challenges. *Sep. Purif. Technol.* 2022; 300: 121925. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121925>

7. Geça M., Wiśniewska M., Nowicki P., Biochars and activated carbons as adsorbents of inorganic and organic compounds from multicomponent systems – A review, *Adv. Colloid Interface Sci.*, 2022; 305: 102687. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102687>

8. El-Sayed Y., Badosz T.J., Effect of Increased basicity of activated carbon surface on valeric acid adsorption from aqueous solution activated carbon. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2003; 5: 4892-4898. <https://doi.org/10.1039/B306983B>

9. Lladó J., Solé-Sardans M., Lao-Luque C., Fuente E., Ruiz B. Removal of pharmaceutical industry pollutants by coal-based activated carbons, *Process Saf. Environ. Prot.* 2016; 104: 294-303. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.09.009>

10. Alves C.C., Franca A.S., Oliveira L.S., Removal of phenylalanine from aqueous solutions with thermo-chemically modi-



fied corn cobs as adsorbents. *LWT-Food Science and Technology*. 2013; 51(1): 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.11.012>.

11. Doulia D., Rigas F., Gimouhopoulos C., Removal of amino acids from water by adsorption on polystyrene resins, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 2013; 76(1): 83-89. [https://doi.org/10.1002/1097-4660\(200101\)76:1<83::AID-JCTB345>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/1097-4660(200101)76:1<83::AID-JCTB345>3.0.CO;2-N)

12. Kushnir A.A., Sukhanov P.T., Savvina A.G., Bondareva L.P., Churilina E.V., Poluzhenkova E.V., Shatalov G.V., Sorption of aromatic acids from aqueous solutions by polymer based on *N*-vinylpyrrolidone, *Russ. J. Appl. Chem.*, 2016; 89: 891-896. <https://doi.org/10.1134/S1070427216060070>

13. Lim A., Chew J.J., Ngu L.H., Ismadji S., Khaerudini D.S., Sunarso J., Synthesis, characterization, adsorption isotherm, and kinetic study of oil palm trunk-derived activated carbon for tannin removal from aqueous solution. *ACS omega*. 2020; 5(44): 28673-28683. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03811>

14. Mojoudi N., Mirghaffari N., Soleimani M., Shariatmadari H., Belver C., Bedia J., Phenol adsorption on high microporous activated carbons prepared from oily sludge: equilibrium, kinetic and thermodynamic studies, *Scientific Reports*, 2019;

9(1): 19352. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55794-4>

15. Sviridova E.S., Voronyuk I.V., Eliseeva T.V., Selemenev V.F., Mukhin V.M. Comparison of the sorption of 4-hydroxybenzaldehyde by activated carbon of different grades under static conditions. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2022; 22(1): 50-57. (In Russ.) <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/9020>

16. Egunova O.R., Shtykov S.N. Concentration of some antibiotics of the fluoroquinolone series by magnetic solid-phase extraction on magnetite nanoparticles, *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2018; 18(6): 825-835. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2018.18/610>

17. Namasivayam C., Senthilkumar S., Removal of Arsenic (V) from aqueous solution using industrial solid waste: adsorption rates and equilibrium studies. *Ind. Eng. Chem. Res.* 1998; 37: 4816-4822.

18. Mohamed E.F., Andriantsiferana C., Wilhelm A.M., Delmas H., Competitive adsorption of phenolic compounds from aqueous solution using sludge-based activated carbon, *Environ. Technol.*, 2011; 32(12): 1325-1336. <https://doi.org/10.1080/09593330.2010.536783>

Информация об авторах / Information about the authors

А.А. Кушнир – к.х.н., доцент кафедры технологии органических соединений, переработки полимеров и техноферной безопасности, ВГУИТ, Воронеж, Россия

А.С. Губин – к.х.н., доцент кафедры технологии органических соединений, переработки полимеров и техноферной безопасности, ВГУИТ, Воронеж, Россия

П.Т. Суханов – д.х.н., профессор кафедры физической и аналитической химии, ВГУИТ, Воронеж, Россия

К.О. Сизо – студентка факультета экологии и химической технологии ВГУИТ, Воронеж, Россия

A.A. Kushnir – Ph.D., Associate Professor, Department of Compound Technology, Polymer Converters and Technosphere Safety, VSUIT, Voronezh, Russia, e-mail: kushnir_aleksei@mail.ru

A.S. Gubin – Ph.D., Associate Professor, Department of Compound Technology, Polymer Converters and Technosphere Safety, VSUIT, Voronezh, Russia, e-mail: goubinne@mail.ru

P.T. Sukhanov – professor, doctor of science (chemistry), Department of Physical and Analytical Chemistry, VSUIT, Voronezh, Russia, e-mail: pavel.sukhanov@mail.ru

K.O. Sizo – student of the Faculty of Ecology and Chemical Technology of VSUIT, Voronezh, Russia, e-mail: ksenia5551406@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30.11.2022; одобрена после рецензирования 04.02.2023; принята к публикации 8.02.2023.

The article was submitted 30.12.2022; approved after reviewing 04.02.2023; accepted for publication 8.02.2023.