

УДК 544.7:543.5:543.64

А.Н.Чеботарев*, Е.В.Бевзюк, Е.М.Рахлицкая, Д.В.Снигур

ОСОБЕННОСТИ СОРБЦИОННОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ПИЩЕВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ СИЛИКАГЕЛЕМ, МОДИФИЦИРОВАННЫМ ХЛОРИДОМ ЦЕТИЛПИРИДИНИЯ

Одесский национальный университет имени И.И.Мечникова,
ул. Дворянская, 2, Одесса, 65082, Украина

* e-mail: alexch@ukr.net

Изучены особенности сорбционного извлечения пищевых красителей бриллиантового голубого FCF и патентованного синего V силикагелем L5/40, модифицированным хлоридом цетилпиридиния (ЦПСи). Установлено, что количественное сорбционное извлечение происходит в течение 15 мин при pH 2 и 4 соответственно. Определены адсорбционные и термодинамические характеристики исследуемых систем. Установлено, что изотермы сорбции данных красителей относятся к Н-типу по классификации Джайлса, что свидетельствует об их высоком сродстве к поверхности. Количественная десорбция возможна при использовании в качестве элюента 0.001 моль/дм³ раствора додецилсульфата натрия в 0.1 моль/дм³ растворе аммиака.

К л ю ч е в ы е с л о в а: пищевые красители, сорбция, силикагель, патентованный синий V, бриллиантовый голубой FCF.

ВВЕДЕНИЕ. На сегодняшний день синтетические красители используются значительно чаще, чем природные, а область их применения чрезвычайно широка. В основном они используются для окрашивания напитков, кондитерских изделий и фармацевтических препаратов с целью создания привлекательного для потребителя внешнего вида. Однако с точки зрения токсикологии в зависимости от концентрации такие красители могут быть канцерогенами, мутагенами и аллергенами [1–4]. Поэтому чрезвычайно важно осуществлять санитарно-гигиенический контроль за содержанием пищевых красителей в объектах различной природы.

Для идентификации и количественного определения пищевых красителей предложены различные методы, среди которых следует выделить хроматографию [5, 6], спектрофотометрию [7, 8] и капиллярный электрофорез [9, 10]. Основная проблема определения пищевых красителей заключается в сложности их извлечения из анализируемых образцов. Для данной цели используют различные экстракционные

методы, например гомогенную и мицеллярную экстракции [11, 12]. Однако они предполагают работу с токсичными органическими растворителями и не всегда достаточно эффективны, вследствие чего нашли применение только для ограниченного круга пищевых продуктов. На наш взгляд, удобным методом выделения определяемого компонента может быть сорбция, поскольку позволяет совместить высокую эффективность процесса извлечения с широким выбором сорбентов и их экономической доступностью [13–16]. К тому же представляется возможным сочетание сорбционного концентрирования с различными методами детектирования, такими как спектроскопия диффузного отражения (СДО) и вольтамперометрия [17, 18]. Известно несколько работ в данной области, например, предложен способ определения красителя Желтый “Солнечный закат” методом спектроскопии диффузного отражения после сорбционного концентрирования [13, 16] на аморфном Al₂O₃. Однако извлечение этого красителя предложенным сорбентом достаточно дли-

тельно во времени и, в некоторых случаях, не количественное. Таким образом, поиск эффективных и доступных сорбентов остается весьма важной задачей.

Среди множества сорбентов неорганической и органической природы и их модифицированных аналогов выгодно отличаются аморфные кремнеземы (силикагель, силохром, аэросил), благодаря своей распространенности, легкости модифицирования поверхности, химической и механической устойчивости, а также белизне, что позволяет совместить сорбционное концентрирование с измерением аналитического сигнала методами СДО или цветометрии [19, 20]. Известно [21–23], что силикагели сорбируют и прочно удерживают за счет гидрофобных сил катионные поверхностно-активные вещества (кПАВ), что необходимо при создании эффективных материалов для извлечения анионных красителей. Особенности сорбции различных кПАВ, в том числе и хлорида цетилпиридиния (ЦПЦИ), посвящена работа [24], в которой аналогично силикагелям изучена их сорбция оксидами алюминия различной кислотно-основной модификации и показано, что при малых концентрациях кПАВ молекулы сорбата располагаются планарно, а при повышении концентрации происходит их переориентация в вертикальное положение и дополнительное закрепление за счет латеральных взаимодействий. К тому же исходные и модифицированные силикагели могут выступать модификаторами угольно-пастовых электродов в вольтамперометрии [25].

Таким образом, цель данной работы состоит в изучении сорбции анионных пищевых красителей силикагелем, модифицированным хлоридом цетилпиридиния, установлении механизма взаимодействия сорбат–сорбент и определении термодинамических характеристик исследуемого процесса.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ. В качестве объектов исследования выбраны широко используемые синтетические пищевые трифенилметановые красители: E133 бриллиантовый голубой FCF (БГ) и E131 патентованный синий V (ПС), исходные растворы которых с концентрацией $1 \cdot 10^{-3}$ моль/дм³ готовили растворением

точных навесок в дистиллированной воде. Предварительно было установлено, что исходный силикагель (СГ) L5/40 слабо ($S < 30\%$) извлекает анионные красители. Поэтому как сорбент применяли СГ L5/40, модифицированный хлоридом цетилпиридиния (СГ-ЦПЦИ), а для сравнения использовали исходный СГ L5/40. Модификацию силикагеля L5/40 проводили согласно [21, 22] с некоторыми изменениями. Для этого на аналитических весах взвешивали 10 г силикагеля ($pH_{ТНЗ}$ 2.5–3.5) и помещали в коническую колбу. Добавляли 100 см³ раствора ЦП (pH 4.0–4.5) с концентрацией $1 \cdot 10^{-3}$ моль/дм³, закрывали пробкой и помещали в аппарат для встряхивания АБУ-6с на 40 мин. После этого полученный модифицированный сорбент СГ-ЦПЦИ отфильтровывали, промывали дистиллированной водой и высушивали.

Электронные спектры поглощения в области 380–780 нм регистрировали на спектрофотометрах Specord UV VIS и СФ-56 в кюветках с толщиной поглощающего слоя 1, 2 и 3 см, спектры диффузного отражения в видимой и инфракрасной области — на спектрофотометрах Specord M40 и Perkin–Elmer Frontier FT-IR Spectrometer соответственно. Кислотность среды контролировали с помощью стеклянного электрода ЭСЛ-63-07 в паре с хлоридсеребряным электродом сравнения ЭВЛ-1МЗ на иономере И-160, отградуированном по стандартным рН-буферным растворам.

Сорбцию пищевых красителей изучали в статических условиях. В ряд стаканов на 50 см³ вносили аликвоту $1–7$ см³ красителя с концентрацией $1 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³, добавляли ~ 10 см³ воды и устанавливали значение рН раствора в диапазоне от 1 до 7 (ΔpH 0.5). Растворы красителей переносили в конические колбы, в которые предварительно внесли по 0.1 г модифицированного силикагеля, закрывали пробками и помещали в аппарат для встряхивания. После окончания сорбции концентрат отделяли от равновесного раствора фильтрованием. Далее отбирали некоторое количество раствора и определяли равновесную концентрацию красителя спектрофотометрически. Степень сорбции находили по формуле:

$$S = (C_{исх} - C_{равн}) / C_{исх} \cdot 100\%,$$

где $C_{\text{исх}}$ — концентрация красителя в сорбционном, а $C_{\text{равн}}$ — в равновесном растворе, моль/дм³.

Оптимизацию условий сорбционного извлечения осуществляли с применением математического планирования эксперимента по методу латинских квадратов 4×4 [26]. Построение и обработку изотерм сорбции, а также расчет термодинамических параметров сорбции — в соответствии с рекомендациями [27]. Эффективные площади красителей рассчитывали с помощью программы Marvin 5.9.1.

Десорбцию красителей с поверхности СГ-ЦПСI проводили 1–50 см³ растворами соляной, серной, азотной и уксусной кислот (0.1–1 моль/дм³), гидроксида натрия и аммония (0.1–1 моль/дм³), органическими растворителями (этиловый спирт, ацетонитрил, диметилсульфоксид), а также водным и аммиачным растворами додецилсульфата натрия (0.001–0.01 моль/дм³). Раствор десорбата переносили в кюветы, предварительно фильтруя через тefлоновый фильтр, и регистрировали спектры светопоглощения. Степень десорбции рассчитывали аналогично степени сорбции.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. Для подтверждения модификации поверхности исходного СГ получены ИК-спектры диффузного отражения образцов немодифицированного и модифицированного сорбентов, для которых наблюдаются полосы поглощения около 1050 см⁻¹, отнесенные к валентным колебаниям силоксановых связей $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$. Полосы при 3750 см⁻¹ отнесены к валентным колебаниям поверхностных силанольных групп, а полосы около 3650 см⁻¹, согласно данным работы [28], соответствуют колебаниям внутренних силанольных групп. Подтверждением модификации матрицы СГ могут служить полосы поглощения при 750 и 850 см⁻¹, которые следует отнести к деформационным колебаниям СН-групп пиридинового кольца, а также полоса при 1600 см⁻¹, относящаяся к валентным колебаниям C=N.

Для подтверждения закрепления пищевых красителей (ПС и БГ) на поверхности СГ-ЦПСI зарегистрированы спектры СДО в видимой области. Как видно из рис. 1, в спектрах СДО наблюдаются коротковолновые и длинноволновые полосы поглощения красителей с мак-

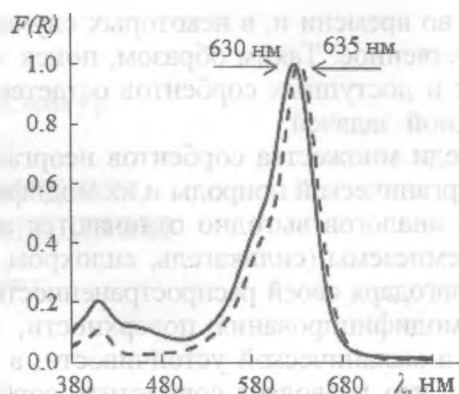


Рис. 1. Нормированные спектры диффузного отражения бриллиантового голубого FCF (сплошная линия) и патентованного синего V (пунктирная линия), сорбированных на модифицированном силикагеле.

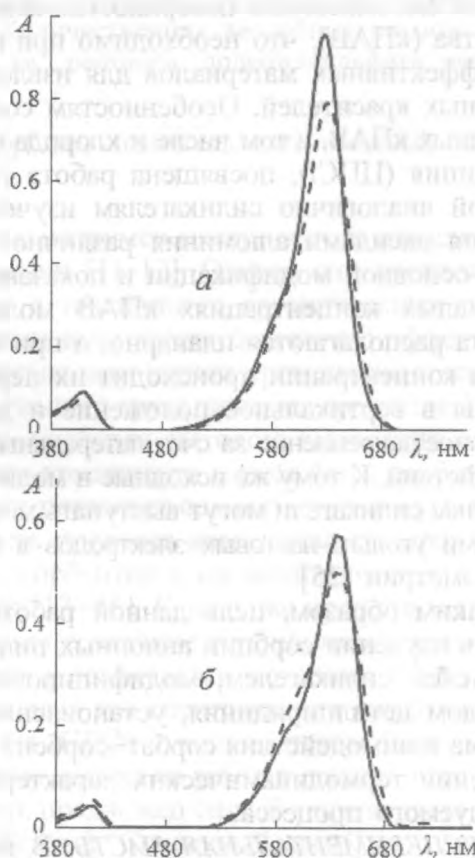


Рис. 2. Спектры светопоглощения водных растворов красителей в отсутствие (сплошная линия) и в присутствии хлорида петилапиридиния (пунктирная линия): а — бриллиантовый голубой FCF; б — патентованный синий V. $C_{\text{крас}} = 1 \cdot 10^{-5}$, $C_{\text{ЦПСI}} = 1 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³, $l = 1$ см.

симулами поглощения при 630 и 635 нм для БГ и ПС соответственно.

Для выяснения механизма взаимодействия БГ и ПС с ЦПС1 в растворах изучены спектры светопоглощения их водных растворов. Из рис. 2, а видно, что в водном растворе БГ имеет малоинтенсивную коротковолновую полосу поглощения (420 нм) и интенсивную полосу с максимумом при 625 нм. В присутствии ЦПС1 наблюдается незначительный батохромный

Оптимальные условия, сорбционные и термодинамические характеристики исследуемых систем при 293 К

Параметр	Бриллиантовый голубой FCF	Патентованный синий V
pH	2.0	4.0
Масса сорбента, г/25 мл	0.30	0.15
Время контакта фаз, мин	15	15
Степень сорбции, %	95–98	93–96
a_{∞} , мкмоль/г	5.9	4.6
$K \cdot 10^{-5}$	3.5	3.8
ΔG , кДж/моль	–31.2	–31.3
ΔH , кДж/моль	–14.8	–0.50
ΔS , Дж/моль·К	59.1	105.3

сдвиг максимума поглощения на 5 нм и снижение интенсивности светопоглощения. Аналогичные изменения происходят и в случае ПС (рис. 2, б). Анализ данных, представленных на рис. 2, позволяет предположить образование ионных ассоциатов между анионами трифенилметановых красителей и катионами цетилпиридиния. При этом незначительные батохромные сдвиги (порядка 5 нм) указывают на участие в образовании ионных ассоциатов отрицательно заряженных сульфогрупп красителей, обладающих изолированной π -электронной системой, которая не вступает в сопряжение с общей хромоформной системой красителя. С применением математического планирования эксперимента оптимизированы условия сорбционного извлечения исследуемых красителей, которые обобщены в таблице.

В оптимальных условиях получены изотермы сорбции при 293 и 317 К (рис. 3). Из ри-

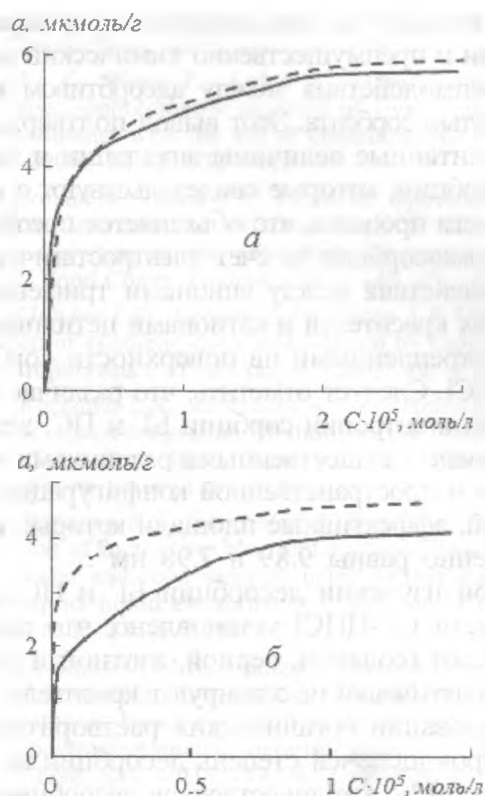


Рис. 3. Изотермы сорбции бриллиантового голубого FCF (а) и патентованного синего V (б) на модифицированном силикагеле при 293 К (сплошная линия) и 317 К (пунктирная линия).

сунка видно, что изотермы можно отнести к Н-типу по классификации Джайлса, что свидетельствует об их высоком сродстве к поверхности. Хемосорбционный характер взаимодействия подтверждается увеличением адсорбции при повышении температуры с 293 до 317 К, что более отчетливо проявляется в случае ПС (рис. 3, б). Установлено, что полученные изотермы сорбции удовлетворительно ($R^2 = 0.95–0.97$) описываются уравнением Ленгмюра. С использованием линеаризированной формы уравнения Ленгмюра рассчитаны величины предельной адсорбции (a_{∞} , мкмоль/г) и значения констант адсорбционного равновесия (K). Применение общеизвестных подходов [27] позволило определить термодинамические характеристики исследуемых систем (таблица).

Рассчитанные термодинамические характеристики сорбции и, в первую очередь, отрицательные значения свободной энергии Гиб-

бса указывают на самопроизвольный характер сорбции и преимущественно химический характер взаимодействия между адсорбтивом и поверхностью сорбента. Этот вывод подтверждают и рассчитанные величины энтальпии и энтропии сорбции, которые свидетельствуют о необратимости процесса, что объясняется преобладанием хемосорбции за счет электростатического взаимодействия между анионами трифенилметановых красителей и катионами цетилпиридиния, закрепленными на поверхности сорбента СГ-ЦПСІ. Следует отметить, что различие в энтальпии и энтропии сорбции БГ и ПС, вероятно, связано с существенными различиями в геометрии и пространственной конфигурации красителей, эффективные площади которых соответственно равны 9.89 и 7.98 нм².

При изучении десорбции БГ и ПС с поверхности СГ-ЦПСІ установлено, что растворы кислот (соляной, серной, азотной и уксусной) практически не элюируют красители. При использовании органических растворителей и растворов щелочей степень десорбции не превышает 30 %, а количественная десорбция наблюдается при элюировании 10 мл 0.001 моль/дм³ раствора додецилсульфата натрия в 0.1 моль/дм³ растворе аммиака. В аммиачном растворе (рН ~10) додецилсульфат натрия существует в практически полностью диссоциированной форме и при этом не разрушается кремнеземная матрица, а десорбция происходит в результате замещения анионов исследуемых трифенилметановых красителей додецилсульфат-анионами и образования новых ионных ассоциатов на поверхности СГ-ЦПСІ.

Таким образом, в данной работе изучены особенности сорбционного извлечения пищевых красителей бриллиантового голубого FCF и патентованного синего V силикагелем, модифицированным хлоридом цетилпиридиния. Установлено, что количественное сорбционное извлечение протекает в течение 15 мин при рН 2 и 4 соответственно. На основании полученных изотерм сорбции Н-типа и рассчитанных термодинамических характеристик сделано заключение о хемосорбционном механизме сорбции. Методами спектроскопии диффузного отражения в инфракрасной и видимой областях под-

тверждено, что сорбция протекает за счет образования на поверхности ионных ассоциатов. Установлено, что количественная десорбция красителей с поверхности модифицированного силикагеля возможна при использовании в качестве элюента 0.001 моль/дм³ раствора додецилсульфата натрия в 0.1 моль/дм³ растворе аммиака.

ОСОБЛИВОСТІ СОРБЦІЙНОГО ВИЛУЧЕННЯ ДЕЯКИХ ХАРЧОВИХ БАРВНИКІВ СИЛІКАГЕЛЕМ, МОДИФІКОВАНИМ ХЛОРИДОМ ЦЕТИЛПІРИДИНІЮ

О.М.Чеботарьов*, К.В.Бевзюк, О.М.Рахлицька, Д.В.Снігур

Одеський національний університет імені І.І.Мечникова, вул. Дворянська, 2, Одеса, 65082, Україна

* e-mail: alexch@ukr.net

Вивчено особливості сорбційного вилучення харчових барвників діамантового блакитного FCF і патентованого синього V силикагелем L5/40, який модифіковано хлоридом цетилпіридинію. Встановлено, що кількісне сорбційне вилучення відбувається впродовж 15 хв при рН 2 і 4 відповідно. Визначено адсорбційні і термодинамічні характеристики досліджуваних систем. Встановлено, що ізотерми сорбції даних барвників відносяться до Н-типу за класифікацією Джайлса, що свідчить про їх високу спорідненість до поверхні сорбенту. Показано, що кількісна десорбція можлива при використанні в якості елюента 0.001 моль/дм³ розчину додецилсульфату натрію в 0.1 моль/дм³ розчині аміаку.

К л ю ч о в і с л о в а: харчові барвники, сорбція, силикагель, патентований синій V, діамантовий блакитний FCF.

SORPTION EXTRACTION PECULIARITIES OF SOME FOOD COLORANTS BY CHLORIDE CETYLPIRIDINIUM MODIFIED SILICA GEL

A.N.Chebotaiev*, K.V.Bevziuk, E.M.Rakhlytskaya, D.V.Snigur

Odessa National I.I.Mechnikov University, 2 Dvoryanska Str., Odessa, 65082, Ukraine

* e-mail: alexch@ukr.net

In this paper, the adsorption of brilliant Blue FCF and the patented blue V food colorants by cetylpyridinium chloride modified silica gel was studied. It was found that quantitative adsorption removal takes place during 15 min at pH 2 and 4, respectively. The adsorp-

tion isotherms are of the H type according to Giles' classification and are described by the Langmuir equation. The conclusion was made on the chemisorption mechanism of adsorption based on the obtained adsorption isotherms and the calculated thermodynamic characteristics. The negative values of the Gibbs free energy indicate a spontaneous character of brilliant Blue FCF and the patented blue V adsorption and a predominantly chemical character of the interaction between the triphenylmethane dyes anions and the surface of the adsorbent. It was shown that the difference in the enthalpy and entropy of the adsorption of brilliant Blue FCF and the patented blue V is probably due to significant differences in the geometry and spatial configuration of the dyes. Using diffuse reflection spectroscopy in the infrared and visible regions, it has been confirmed that adsorption proceeds through the formation of ionic associates between cetylpyridinium cations and brilliant Blue FCF and patented blue V food colorants anions on the surface. The high affinity of the investigated brilliant Blue FCF and patented blue V triphenylmethane dyes anions to the surface of the modified silica gel causes the complexity of their desorption. It was found that the quantitative desorption of brilliant Blue FCF and patented blue V from the surface of the modified silica gel is possible by using 0.001 mol/dm^3 of sodium dodecylsulfate solution in 0.1 mol/dm^3 ammonia solution.

Key words: food colorants, sorption, silica gel, patented blue V, brilliant Blue FCF.

ЛИТЕРАТУРА

1. Elbann K., Sarhan O.M., Khider M. et al. Microbiological, histological, and biochemical evidence for the adverse effects of food azo dyes on rats // *J. Food and Drug Analysis*. -2017. -**25**. -P. 667–680.
2. Yamjala K., Nainar M.S., Ramiseti N.R. Methods for the analysis of azo dyes employed in food industry – A review // *Food Chem.* -2016. -**192**. -P. 813–824.
3. Coman V., Copaciu F. Analysis of Dyes and Inks // *Instrumental Thin-Layer Chromatography*. -2015. -P. 555–588.
4. Amin K.A., Abdel Hameid H., Abd Elsttar A.H. Effect of food azo dyes tartrazine and carmoisine on biochemical parameters related to renal, hepatic function and oxidative stress biomarkers in young male rats // *Food Chem. Toxicol.* -2010. -**48**. -P. 2994–2999.
5. Andrade F.I.d., Guedes M.I.F., Vieira G.P. et al. Determination of synthetic food dyes in commercial soft drinks by TLC and ion-pair HPLC // *Food Chem.* -2014. -**157**. -P. 193–198.
6. Bento W., Lima B., Paim A.. Simultaneous determination of synthetic colorants in yogurt by HPLC // *Food Chem.* -2015. -**183**. -P. 154–160.
7. Ni Y., Wang Y., Kokot S.. Simultaneous kinetic spectrophotometric analysis of five synthetic food colorants with the aid of chemometrics // *Talanta*. -2009. -**78**. -P. 432–441.
8. Soylak M., Unsal Y.E., Tuzen M. Spectrophotometric determination of trace levels of allura red in water samples after separation and preconcentration // *Food Chem. Toxicol.* -2011. -**49**. -P. 1183–1187.
9. Giovine L.D., Giovine L.D., Bocca A.P. Determination of synthetic dyes in ice-cream by capillary electrophoresis // *Food Control*. -2003. -**14**. -P. 131–135.
10. Kartsova L.A., Alekseeva A.V., Khmel'nitskii I.K. et al. Electromigration Methods in the Determination of Synthetic Food Dyes // *J. Anal. Chem.* -2009. -**64**, № 12. -P. 1264–1269.
11. Razmara R.S., Daneshfar A., Sahrai R. Determination of methylene blue and sunset yellow in wastewater and food samples using salting-out assisted liquid–liquid extraction // *J. Ind. Eng. Chem. Res.* -2011. -**17**. -P. 533–536.
12. El-Shahawi M.S., Hamza A., Al-Sibaai A.A. et al. A new method for analysis of sunset yellow in food samples based on cloud point extraction prior to spectrophotometric determination // *J. Ind. Eng. Chem. Res.* -2013. -**19**, № 2. -P. 529–535.
13. Dotto G.L., Pinto L.A.A., Hachicha M.A., Knani S. New physicochemical interpretations for the adsorption of food dyes on chitosan films using statistical physics treatment // *Food Chem.* -2015. -**171**. -P. 1–7.
14. Dotto G.L., Pinto L.A.A. Adsorption of food dyes onto chitosan: Optimization process and kinetic // *Carbohydrate Polymers*. -2011. -**84**. -P. 231–238.
15. Yagub M.T., Sen T.K., Afroze Sh., Ang H.M. Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review // *Adv. Colloid Interface Sci.* -2014. -**209**. -P. 172–184.
16. Ramazanova G.R., Tikhomirova T.I., Apyari V.V. Adsorption of Sunset Yellow FCF Food Dye from aqueous solutions and its determination by diffuse reflectance spectroscopy // *J. Anal. Chem.* -2015. -**70**, № 6. -P. 685–690.
17. Vidotti E.C., Cancino J.C., Oliveira C.C., Rollemberg M. Simultaneous determination of food dyes by first derivative spectrophotometry with sorption onto polyurethane foam // *Anal. Sci.* -2005. -**21**. -P. 149–153.
18. Tikhomirova T.I., Ramazanova G.R., Apyari V.V. A hybrid sorption – spectrometric method for determination of synthetic anionic dyes in foodstuffs // *Food Chem.* -2016. -**221**. -P. 351–355.
19. Chih-Hung H., Kai-Ping C., Hong-De Ou et al.

- Adsorption of cationic dyes onto mesoporous silica // *Microporous Mesoporous Mat.* -2011. -**141**. -P. 102–109.
20. Volikova A.B., Ponomarenko S.A., Konstantinova A.I. et al. Nature-like solution for removal of direct brown 1 azo dye from aqueous phase using humics-modified silica gel // *Chemosphere.* -2016. -**145**. -P. 83–88.
 21. Xiao-kun Ma, Nam-Hee Lee, Hyo-Jin Oh et al. Surface modification and characterization of highly dispersed silica nanoparticles by a cationic surfactant // *Colloid Surf. A.* -2010. -**358**. -P. 172–176.
 22. Serreau L., Beauvais M., Heitz C., Barthel E. Adsorption and onset of lubrication by a double-chained cationic surfactant on silica surfaces // *J. Colloid Interface Sci.* -2009. -**332**, № 2. -P. 382–388.
 23. Zaporozhets O.A., Shulga O.V., Nadzhafova O.Yu. et al. The nature of the binding of high-molecular weight aminoammonium and quaternary ammonium salts with the amorphous silica surface // *Colloids Surf. A.* -2000. -**168**. -P. 103–108.
 24. Чеботарев А.Н., Щербакова Т.М., Деревянко Е.В., Головки А.А. Адсорбционное модифицирование ионогенными ПАВ оксидов алюминия с различными кислотно-основными характеристиками // *Вісн. ОНУ. Хімія.* -2009. -**14**, № 2. -С. 139–146.
 25. Songyang Y., Yang X., Xie Sh. et al. Highly-sensitive and rapid determination of sunset yellow using functionalized montmorillonite-modified electrode // *Food Chem.* -2015. -**173**. -P. 640–644.
 26. Пономарев В.Д. Аналитическая химия (в двух частях). -М.: Высш. шк., 1982.
 27. Ягдовский В.Д. Адсорбция. -М.: Бином. Лаборатория знаний, 2015.
 28. Parida S.K., Dash S., Patel S., Mishra B.K. Adsorption of organic molecules on silica surface // *Adv. Colloid Interface Sci.* -2006. -**121**. -P. 77–110.
 - des F.N.P., Rodrigues P.A.S., Maia C.S.C., Avila M.M.M., Ribeiro L.D.M. Determination of synthetic food dyes in commercial soft drinks by TLC and ion-pair HPLC. *Food Chem.* 2014. **157**: 193.
 6. Bento W., Lima B., Paim A. Simultaneous determination of synthetic colorants in yogurt by HPLC. *Food Chem.* 2015. **183**: 154.
 7. Ni Y., Wang Y., Kokot S. Simultaneous kinetic spectrophotometric analysis of five synthetic food colorants with the aid of chemometrics. *Talanta.* 2009. **78**: 432.
 8. Soylak M., Unsal Y.E., Tuzen M. Spectrophotometric determination of trace levels of allura red in water samples after separation and preconcentration. *Food Chem. Toxicol.* 2011. **49**: 1183.
 9. Giovine L.D., Bocca A.P. Determination of synthetic dyes in ice-cream by capillary electrophoresis. *Food Control.* 2003. **14**: 131.
 10. Kartsova L.A., Alekseeva A.V., Khmel'nitskii I.K., Komissarchik S.M., Nyanikova G.G., Berezkin V.G. Electromigration Methods in the Determination of Synthetic Food Dyes. *J. Anal. Chem.* 2009. **64** (12): 1264.
 11. Razmara R.S., Daneshfar A., Sahrai R. Determination of methylene blue and sunset yellow in wastewater and food samples using salting-out assisted liquid-liquid extraction. *J. Ind. Eng. Chem. Res.* 2011. **17**: 533.
 12. El-Shahawi M.S., Hamza A., Al-Sibaai A.A., Bashammakh A.S., Al-Saidi H.M. A new method for analysis of sunset yellow in food samples based on cloud point extraction prior to spectrophotometric determination. *J. Ind. Eng. Chem. Res.* 2013. **19** (2): 529.
 13. Dotto G.L., Pinto L.A.A., Hachicha M.A., Knani S. New physicochemical interpretations for the adsorption of food dyes on chitosan films using statistical physics treatment. *Food Chem.* 2015. **171**: 1.
 14. Dotto G.L., Pinto L.A.A. Adsorption of food dyes onto chitosan: Optimization process and kinetic. *Carbohydrate Polymers.* 2011. **84**: 231.
 15. Yagub M.T., Sen T.K., Afroze Sh., Ang H.M. Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2014. **209**: 172.
 16. Ramazanov G.R., Tikhomirova T.I., Apyari V.V. Adsorption of Sunset Yellow FCF Food Dye from aqueous solutions and its determination by diffuse reflectance spectroscopy. *J. Anal. Chem.* 2015. **70** (6): 685.
 17. Vidotti E.C., Cancino J.C., Oliveira C.C., Rollemberg M. Simultaneous determination of food dyes by first derivative spectrophotometry with sorption onto polyurethane foam. *Anal. Sci.* 2005. **21**: 149.
 18. Tikhomirova T.I., Ramazanov G.R., Apyari V.V. A hybrid sorption – spectrometric method for deter-

REFERENCES

- mination of synthetic anionic dyes in foodstuffs. *Food Chem.* 2016. **221**: 351.
19. Chih-Hung H., Kai-Ping C., Hong-De Ou, Yu-Chun C., Chu-Fang W. Adsorption of cationic dyes onto mesoporous silica. *Microporous Mesoporous Mat.* 2011. **141**: 102.
20. Volikova A.B., Ponomarenko S.A., Konstantinova A.I., Hatfield K., Perminova I.V. Nature-like solution for removal of direct brown 1 azo dye from aqueous phase using humics-modified silica gel. *Chemosphere.* 2016. **145**: 83.
21. Xiao-kun Ma, Nam-Hee Lee, Hyo-Jin Oh, Jae-Woo Kim, Chang-Kyu Rhee, Kyoung Soon Park, Sun-Jae Kim. Surface modification and characterization of highly dispersed silica nanoparticles by a cationic surfactant. *Colloids Surf. A.* 2010. **358**: 172.
22. Serreau L., Beauvais M., Heitz C., Barthel E. Adsorption and onset of lubrication by a double-chained cationic surfactant on silica surfaces. *J. Colloid Interface Sci.* 2009. **332** (2): 382.
23. Zaporozhets O.A., Shulga O.V., Nadzhafova O.Yu., Turov V.V., Sukhan V.V. The nature of the binding of high-molecular weight aminoammonium and quaternary ammonium salts with the amorphous silica surface. *Colloids Surf. A.* 2000. **168**: 103.
24. Chebotarev A.N., Shherbakova T.M., Derevjanko E.V., Golovko A.A. Adsorption modification with ionic surfactants of aluminum oxides with various acid-base characteristics. *Visnik ONU. Chem.* 2009. **14** (2): 139. [in Russian].
25. Songyang Y., Yang X., Xie Sh., Hao H., Song J. Highly-sensitive and rapid determination of sunset yellow using functionalized montmorillonite-modified electrode. *Food Chem.* 2015. **173**: 640.
26. Ponomarev V.D. Analytical chemistry (in two parts). (Moscow: Vyssh. shkola, 1982). [in Russian].
27. Jagodovskij V.D. Adsorption. (Moscow: Binom. Laboratorija znaniy, 2015). [in Russian].
28. Parida S.K., Dash S., Patel S., Mishra B.K. Adsorption of organic molecules on silica surface. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2006. **121**: 77.

Поступила 26.07.2018