

Адсорбция резорцина сорбентами на основе сапропеля

© 2026. И. В. Зыкова¹, д. х. н., профессор, В. А. Исаков², к. х. н., доцент,
Н. М. Мишина¹, ассистент, Я. Н. Мануриков², ассистент,

¹Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,
191186, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 18,

²Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого,
173003, Россия, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 41,
e-mail: zykova-irina@yandex.ru

Комплексная очистка сточных вод от различных по природе загрязнителей является актуальной проблемой, и разработка новых сорбентов имеет большое научное и практическое значение. На основе сапропеля получены сорбенты: термоокисленный сапропель, гуминовые кислоты, выделенные из сапропеля, модифицированный гуминовыми кислотами термоокисленный сапропель, органоминеральный композиционный материал на основе термоокисленного сапропеля и бентонита. Адсорбцию резорцина из модельных растворов с концентрациями от $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ моль/дм³ сорбентами на основе сапропеля проводили в статических условиях при соотношении 1 г сорбента на 200 см³ раствора. Установлено, что лимитирующей стадией адсорбции резорцина сорбентами на основе сапропеля является смешанная диффузия. Для описания адсорбции резорцина сорбентами на основе сапропеля применимы теории адсорбции Ленгмюра, Фрейндлиха, Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ) и Дубинина–Радускевича. Учитывая значения энергии активации и термодинамические параметры адсорбции резорцина полученными сорбентами на основе сапропеля механизм адсорбции резорцина можно считать полимолекулярную адсорбцию на поверхности и физическую адсорбцию за счёт объёмного заполнения микро- и мезопор, а также полостей. Резорцин также может образовывать с сорбентами на основе сапропеля ковалентные и водородные связи с силикатными и алюмосиликатными группами, водородные связи с аминогруппами. Поэтому разделить вклад физической адсорбции и возможных химических взаимодействий функциональных групп сорбентов на основе сапропеля с резорцином достаточно сложно. Предельные величины адсорбции резорцина сорбентами на основе сапропеля, рассчитанные по уравнению БЭТ (0,25–1,00 ммоль/г) и уравнению Дубинина–Радускевича (0,52–2,60 ммоль/г), сопоставимы с другими разработанными сорбентами.

Ключевые слова: адсорбция, термоокисленный сапропель, гуминовые кислоты, бентонитовая глина, модифицированный сорбент, резорцин.

Resorcinol adsorption on sapropel-based sorbents

© 2026. I. V. Zyкова¹ ORCID: 0000-0002-1914-7761, V. A. Isakov² ORCID: 0000-0001-5669-7079,
N. M. Mishina¹ ORCID: 0009-0005-2144-5150, Ya. N. Manurikov² ORCID: 0009-0003-8781-8808

¹Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
18, Bolshaya Morskaya St., Saint Petersburg, Russia, 191186,

²Yaroslav-the-Wise Novgorod State University,
44, Bolshaya Sankt-Peterburgskaya St., Velikiy Novgorod, Russia, 173003,
e-mail: zykova-irina@yandex.ru

Comprehensive wastewater treatment from various pollutants is an urgent problem, and the development of new sorbents is of great scientific and practical importance. Sorbents based on sapropel were obtained: thermally oxidized sapropel, humic acids isolated from sapropel, thermally oxidized sapropel modified with humic acids, organomineral composite material based on thermally oxidized sapropel and bentonite. Resorcinol adsorption from model solutions with concentrations from $1 \cdot 10^{-5}$ to $1 \cdot 10^{-2}$ mol/dm³ on sapropel-based sorbents was carried out under static conditions at a ratio of 1 g of sorbent per 200 cm³ of solution. It is shown that the limiting stage of resorcinol adsorption on sapropel-based sorbents is mixed diffusion. The adsorption theories of Langmuir, Freundlich, Brunauer–Emmett–Teller (BET) and Dubinin–Radushkevich are applicable to describe the resorcinol adsorption on sapropel-based sorbents. Taking into account the values of the activation energy and thermodynamic parameters of resorcinol adsorption, the obtained sapropel-based sorbents can be considered as the mechanism of resorcinol adsorption on the surface and physical adsorption due to volumetric filling of micro- and mesopores, as well as cavities. Resorcinol can also form covalent and hydrogen bonds

with silicate and aluminosilicate groups, and hydrogen bonds with amino groups with sapropel-based sorbents. Therefore, it is quite difficult to separate the contribution of physical adsorption and possible chemical interactions of functional groups of sapropel-based sorbents with resorcinol. Limiting values of resorcinol adsorption on sapropel-based sorbents calculated by the BET equation (0.25–1.00 mmol/g) and the Dubinin–Radushkevich equation (0.52–2.60 mmol/g), comparable to other developed sorbents.

Keywords: adsorption, thermally oxidized sapropel, humic acids, bentonite clay, modified sorbent, resorcinol.

Для очистки промышленных сточных вод разработано много методов и технологий, позволяющих снижать антропогенную нагрузку на водные объекты. Заключительным этапом в технологических процессах, как правило, является доочистка стоков с применением сорбционных материалов. В подавляющем большинстве случаев существующие на рынке природные монокомпонентные сорбенты характеризуются селективными сорбционными свойствами в отношении определённого класса загрязнителей. Научноёмкие разработки сорбционных материалов, которые позволяют комплексно сорбировать загрязнители различной химической природы вплоть до полного их поглощения, имеют очень высокую стоимость. Относительно недорогие сорбенты, способные очищать воду от различных по природе загрязнителей, практически отсутствуют. Поэтому комплексная очистка сточных вод от различных по природе загрязнителей является актуальной проблемой, и разработка новых сорбентов имеет большое научное и практическое значение.

Сапропели – возобновляемое природное органическое сырьё. На территории России сапропель встречается практически повсеместно, суммарные запасы составляют около 300 млрд м³. Только в Ленинградской и Новгородской областях ежегодно образуется до 1 млн м³ сапропеля. В настоящее время сапропель не находит квалифицированного применения. Возрастание объёмов сапропеля приводит к заболачиванию озёр.

Сапропель, обладая уникальным органоминеральным составом, может служить сырьём для получения дешёвых и эффективных углеродминеральных сорбентов, включая композиционные сорбенты на его основе, для очистки сточных вод от различных по природе загрязнителей [1, 2].

Фенол и его производные, попадающие в сточные воды различных производств (химической, деревоперерабатывающей и других отраслей), оказывают токсическое влияние на живые организмы, содержание биогенных элементов и растворённых газов в водоёмах [3, 4].

Для очистки сточных вод от фенола и его

производных наиболее широко применяют сорбционные методы [5–8]. В настоящее время разработаны синтетические сорбенты (магнийсодержащий сорбент, криогель-сорбент, продукт пиролиза автомобильных шин и др.) и природные (монтмориллонитовая и бентонитовая глины, древесные опилки и др.), а также сорбенты на основе отходов сельскохозяйственных производств (лузга гречихи, подсолнечника, риса и др.) [9–12]. Однако, несмотря на большое количество разработанных сорбентов, механизмы взаимодействия фенолов с ними, а также термодинамика и кинетика процесса теоретически до конца не проработаны. Кроме того, существуют большие трудности с получением предложенных сорбентов в промышленных масштабах.

Целью исследования явилось изучение адсорбционных свойств сорбентов на основе сапропеля по отношению к органическим загрязнителям на примере резорцина.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта для получения сорбентов использовали сапропель озера Липово Новгородской области с массовой долей органических веществ 69–70 %. Сапропель высушивали до воздушно-сухого состояния при температуре 105 °С. Исходный сапропель содержит значительные количества водорастворимых веществ. При контакте его с водой при разных значениях pH могут вымываться гумусовые и легкогидролизуемые вещества, что ухудшает качество очистки воды вследствие вторичного загрязнения. Поэтому более эффективно использовать в качестве сорбента термоокисленный сапропель, что исключает вторичное загрязнение воды вымываемыми из сорбента веществами [13].

На основе сапропеля получили сорбенты [14]:

1. Термоокисленный при 600 °С сапропель (ТС/TS). В результате термоокисления происходит выделение летучих продуктов, за счёт чего формируется пористая структура сорбента, а также изменяются состав и свойства поверхности. Термоокисление способствует

увеличению удельной поверхности, пористости и количества функциональных групп на поверхности сорбента.

2. Гуминовые кислоты (ГК/НА), выделенные из сапропеля. Гуминовые кислоты обладают развитой удельной поверхностью, содержат большое количество функциональных групп (карбоксильных, гидроксильных, лактонных и аминных) и гидрофобных участков на поверхности, способных связывать органические и неорганические загрязнители.

3. Модифицированный гуминовыми кислотами термоокисленный сапропель (МТСГК/МТSHA). Модификацию гуминовыми кислотами проводили с целью увеличения количества функциональных групп и гидрофобных участков на поверхности термоокисленного сапропеля.

4. Органоминеральный композиционный материал (ОМКМ/ОМСМ) на основе термоокисленного сапропеля и бентонита. Введение бентонита в структуру сорбента способствует увеличению минеральной части и появлению на поверхности сорбента дополнительных силикатных и алюмосиликатных функциональных групп.

В качестве загрязнителя использовали резорцин, относящийся к четвёртому классу опасности. Фенолы, в том числе резорцин, являются одними из распространённых и приоритетных загрязнителей сточных вод химических и деревоперерабатывающих производств. При превышении нормативов фенолы оказывают токсичное действие на гидробионты и экосистемы за счёт нарушения естественного круговорота органических веществ в водоёмах [15].

Изучение адсорбции резорцина из модельных водных растворов (концентрации 0,01–10,00 ммоль/дм³) полученными сорбентами проводили при температурах 20 и 40 °С в статических условиях при соотношении 1 г сорбента на 200 см³ раствора. Для приготовления модельных растворов загрязнителей использовали сверхчистую воду (система очистки воды Best-S15 UV). Диапазон выбранных концентраций резорцина превышает ПДК для питьевой воды в 10 и более раз.

Концентрацию резорцина в модельных растворах определяли флуориметрическим методом с использованием анализатора жидкости Флюорат-02-2М (Люмэкс, Россия).

Эксперименты проводили в пятикратной повторности, статистическую обработку результатов проводили с использованием

программного обеспечения Microsoft Office Excel 2010.

Результаты и обсуждение

Кинетические кривые адсорбции резорцина из модельных растворов с концентрацией 0,1 ммоль/дм³ полученными сорбентами представлены на рисунке 1.

Для изучения механизма адсорбции и определения лимитирующих стадий кинетические кривые адсорбции резорцина из модельных растворов полученными сорбентами были проанализированы с использованием четырёх основных кинетических моделей: Лагергрена (псевдопервого порядка), Хо и Маккея (псевдовторого порядка), Морриса–Вебера и Бойда. Адсорбция резорцина в линейных координатах указанных кинетических моделей представлена на примере модифицированного гуминовыми кислотами термоокисленного сапропеля (рис. 2) [15].

Прямолинейная зависимость кривых адсорбции резорцина полученными сорбентами согласно кинетической модели Бойда (рис. 2а) позволяет говорить о том, что межфазный перенос лимитируется внутренней диффузией, однако, наличие излома на кривых адсорбции резорцина полученными сорбентами согласно кинетической модели Морриса–Вебера (рис. 2б) указывает на смешанно-диффузионный характер адсорбции.

Установлено, что зависимость величины адсорбции резорцина полученными сорбентами от времени контакта удовлетворительно описывается кинетическими моделями как Лагергрена (рис. 2в), так и Хо и Маккея (рис. 2г). Кинетические величины адсорбции резорцина полученными сорбентами по моделям Лагергрена и Хо и Маккея представлены в таблице 1.

Изотермы адсорбции резорцина на полученных сорбентах представлены на рисунке 3.

Для описания процесса адсорбции резорцина на полученных сорбентах использовали уравнения теорий адсорбции Ленгмюра, Фрейндлиха, Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ) и Дубинина–Радускевича. Изотермы адсорбции резорцина в линейных координатах указанных уравнений представлены на примере модифицированного гуминовыми кислотами термоокисленного сапропеля (рис. 4).

Для описания адсорбции резорцина сорбентами на основе сапропеля применимы теории адсорбции Ленгмюра, Фрейндлиха, БЭТ и Дубинина–Радускевича. Термоди-

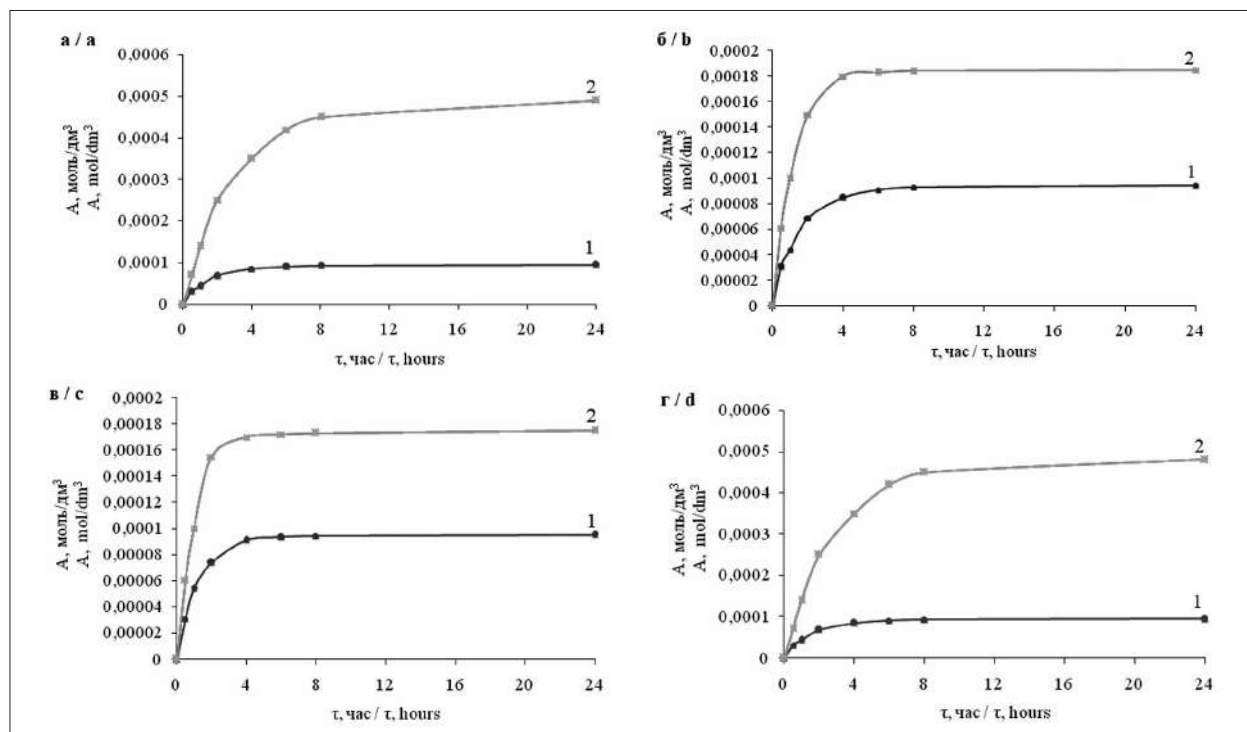


Рис. 1. Изменения адсорбции резорцина на ТС (а), ГК (б), МТСГК (в), ОМКМ (г) во времени при температурах 20 °С (1) и 40 °С (2). Здесь и далее на рисунках и в таблицах: ТС – термоокисленный сапропель; ГК – гуминовые кислоты, выделенные из сапропеля; МТСГК – модифицированный гуминовыми кислотами ТС; ОМКМ – органоминеральный композиционный материал на основе ТС и бентонита / **Fig. 1.** Changes in resorcinol adsorption on TS (a), HA (b), MTSHA (c), OMCM (d) over time at temperatures of 20 °C (1) and 40 °C (2). Here and further in the figures and tables: TS – thermally oxidized sapropel; HA – humic acids isolated from sapropel; MTSHA – TS modified with humic acids; OMCM – organomineral composite based on TS and bentonite

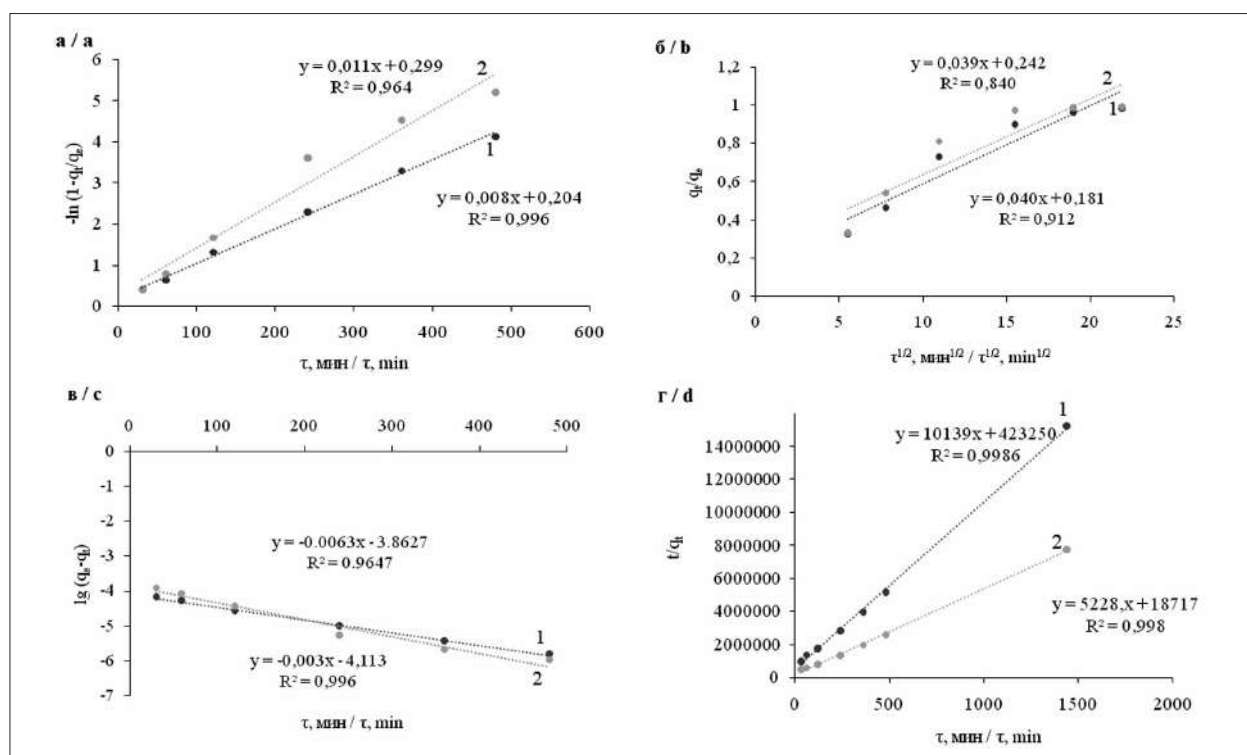


Рис. 2. Адсорбция резорцина на МТСГК при температурах 20 °С (1) и 40 °С (2) во времени в линейных координатах кинетических моделей Бойда (а), Морриса–Вебера (б), Лагергрена (в), Хо и Маккея (г) / **Fig. 2.** Resorcinol adsorption on MTSHA at 20 °C (1) and 40 °C (2) in time in linear coordinates of Boyd (a), Morris–Weber (b), Lagergren (c), Ho and McKay (d) kinetic models

Таблица 1 / Table 1
Кинетические величины адсорбции резорцина полученными сорбентами / Kinetic values of resorcinol adsorption by the obtained sorbents

Кинетическая модель Kinetic model	Кинетическая величина Kinetic value	Сорбенты / Sorbents			
		ТС / TS	ГР / HA	МТСГР / MTSNA	ОМГМ / OMCM
Лажергрена Lagergren	Энергия активации, кДж · моль ⁻¹ Activation energy, kJ · mol ⁻¹	14,9 ± 0,7	27,9 ± 0,9	20,3 ± 0,8	15,0 ± 0,7
	Константа скорости при 20 °С, мин ⁻¹ Velocity constant at 20 °C, min ⁻¹	(5,3 ± 0,2) · 10 ⁻³	(8,5 ± 0,3) · 10 ⁻³	(8,5 ± 0,3) · 10 ⁻⁵	(5,8 ± 0,2) · 10 ⁻⁵
	Константа скорости при 40 °С, мин ⁻¹ Velocity constant at 20 °C, min ⁻¹	(7,8 ± 0,3) · 10 ⁻³	(17,7 ± 0,6) · 10 ⁻⁵	(14,5 ± 0,4) · 10 ⁻⁵	(8,5 ± 0,3) · 10 ⁻⁵
Хо и Маккея Ho and McKay	Энергия активации, кДж · моль ⁻¹ Activation energy, kJ · mol ⁻¹	14,5 ± 0,6	28,4 ± 1,0	20,9 ± 0,8	15,7 ± 0,7
	Константа скорости при 20 °С, г · ммоль ⁻¹ · мин ⁻¹ / Velocity constant at 20 °C, g · mmol ⁻¹ · min ⁻¹	(5,4 ± 0,2) · 10 ⁻⁵	(5,5 ± 0,2) · 10 ⁻⁵	(6,6 ± 0,2) · 10 ⁻⁵	(5,4 ± 0,2) · 10 ⁻⁵
	Константа скорости при 40 °С, г · ммоль ⁻¹ · мин ⁻¹ Velocity constant at 20 °C, g · mmol ⁻¹ · min ⁻¹	(7,9 ± 0,3) · 10 ⁻⁵	(12,0 ± 0,4) · 10 ⁻⁵	(11,5 ± 0,3) · 10 ⁻⁵	(8,2 ± 0,3) · 10 ⁻⁵

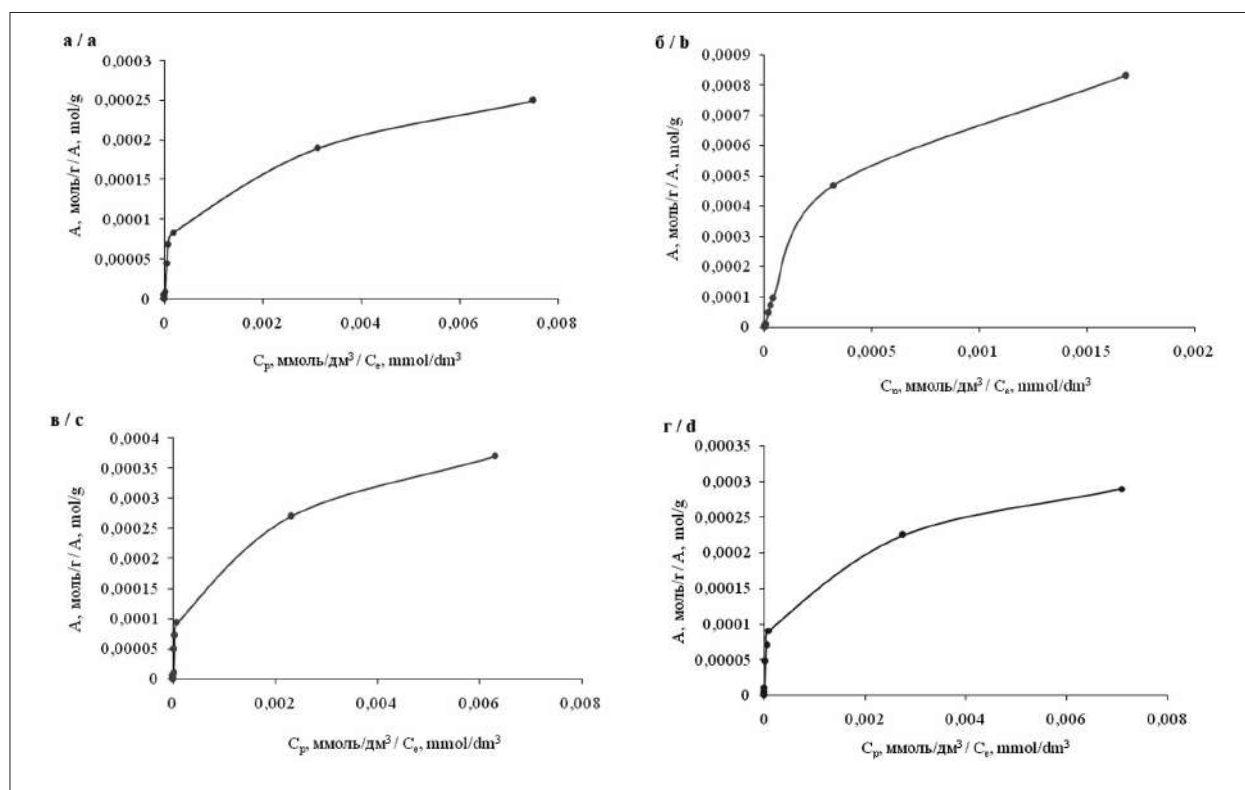


Рис. 3. Изотермы адсорбции резорцина на полученных сорбентах:
а – ТС, б – ГР, в – МТСГК, г – ОМКМ

Fig. 3. Isotherms of resorcinol adsorption on the obtained sorbents:
a – TS, б – HA, в – MTSHA, г – OMCM

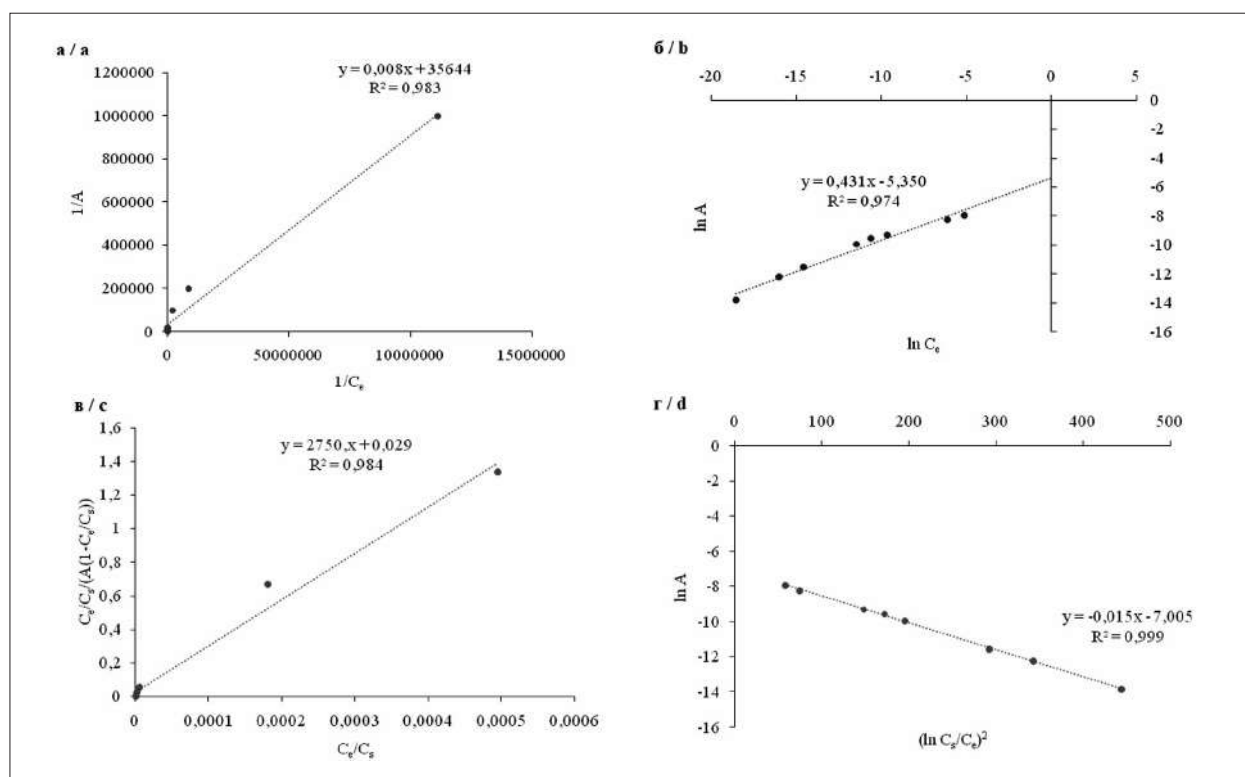


Рис. 4. Изотерма адсорбции резорцина на МТСГК в линейных координатах уравнений Ленгмюра (а), Фрейндлиха (б), Брунауэра–Эммета–Теллера (в), Дубинина–Радужкевича (г)

Fig. 4. Isotherm of resorcinol adsorption on MTSHA in linear coordinates of Langmuir (a), Freundlich (b), Brunauer–Emmett–Teller (c), Dubinin–Radushkevich (d) equations

Таблица 2 / Table 2

Термодинамические величины адсорбции резорцина полученными сорбентами
Thermodynamic values of resorcinol adsorption by the obtained sorbents

Теория адсорбции Adsorption theory	Термодинамическая величина Thermodynamic value	Сорбенты / Sorbents			
		ТС TS	ГК HA	МТСГК MTSHA	ОМКМ ОМСМ
Ленгмюра Langmuir	Предельная величина адсорбции, ммоль/г Adsorption maximum value, mmol/g	0,0217±0,0009	0,106±0,004	0,0287±0,0013	0,0272±0,0012
	Константа адсорбционного равновесия / Adsorption equilibrium constant	4397904±205895	29999±1400	4050454±198520	3434019±161700
	Коэффициент аппроксимации / Approximation ratio	0,9693±0,0385	0,9953±0,0397	0,9834±0,0391	0,9826±0,0387
Фрейндлиха Freundlich	Константа Фрейндлиха (K) The Freundlich constant (K)	0,00259±0,00011	0,27673 ±0,01284	0,00475±0,00021	0,00334±0,00015
	Эмпирический показатель, отражающий гетерогенность поверхности (n) / An empirical indicator reflecting the heterogeneity of the surface (n)	2,39±0,10	1,22±0,05	2,32±0,08	2,40±0,11
	Коэффициент аппроксимации Approximation ratio	0,9854±0,0452	0,9787±0,0439	0,9744±0,0411	0,9744±0,0412
БЭТ Brunauer– Emmett–Teller	Предельная величина адсорбции, ммоль/г Adsorption maximum value, mmol/g	0,246±0,011	1,014±0,041	0,364±0,015	0,286±0,012
	Константа адсорбционного равновесия / Adsorption equilibrium constant	64743±3217	34614±1630	94203±4503	92054±4392
	Коэффициент аппроксимации Approximation ratio	0,9859±0,0432	0,9984±0,0457	0,9847±0,0422	0,9896±0,0433
Дубинина– Радушкевича Dubinin– Radushkevich	Предельная величина адсорбции, ммоль/г Adsorption maximum value, mmol/g	0,527±0,023	2,603±0,127	0,907±0,043	0,694±0,033
	Характеристическая энергия адсорбции, кДж Characteristic adsorption energy, kJ	20,297±0,932	14,052±0,522	20,030±0,897	20,297±0,922
	Коэффициент аппроксимации Approximation ratio	0,9935±0,0453	0,9949±0,0455	0,9992±0,0462	0,9993±0,0467

Таблица 3 / Table 3

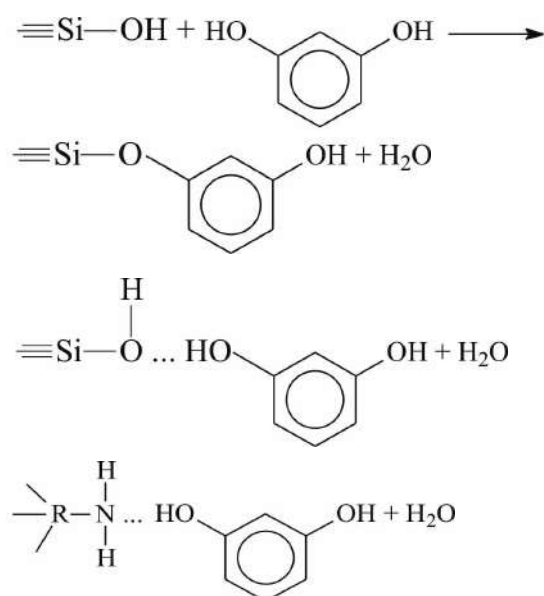
Текстуальные характеристики сорбентов на основе сапропеля
Textural characteristics of sorbents based on sapropel

Текстуальные характеристики Textural characteristics	Сорбенты / Sorbents			
	ТС TS	ГК HA	МТСГК MTSHA	ОМКМ OMCM
Удельная поверхность адсорбента, м ² /г Adsorbent specific surface area, m ² /g	82,5 ± 3,9	407,6 ± 20,2	142,0 ± 6,9	108,7 ± 5,3
Объём микропор адсорбента, см ³ /г Adsorbent micropores volume, cm ³ /g	0,061 ± 0,002	0,293 ± 0,011	0,105 ± 0,004	0,080 ± 0,003
Объём мезопор адсорбента, см ³ /г Adsorbent mesopores volume, cm ³ /g	0,032 ± 0,001	0,112 ± 0,004	0,045 ± 0,002	0,032 ± 0,001

намические величины адсорбции резорцина полученными сорбентами представлены в таблице 2.

Текстуальные характеристики сорбентов на основе сапропеля, рассчитанные на основе теорий адсорбции БЭТ и Дубинина-Радushкевича, представлены в таблице 3.

Учитывая значения энергии активации и термодинамические параметры адсорбции резорцина полученными сорбентами на основе сапропеля механизмом адсорбции резорцина можно считать полимолекулярную адсорбцию на поверхности и физическую адсорбцию за счёт объёмного заполнения микро- и мезопор, а также полостей. Резорцин также может образовывать с функциональными группами сорбентов на основе сапропеля ковалентные и водородные связи с силикатными и алюмосиликатными группами, водородные связи с аминогруппами:



Поэтому, разделить вклад физической адсорбции и возможных химических взаимодействий функциональных групп сорбентов

на основе сапропеля с резорцином достаточно сложно.

Высокое значение предельной величины адсорбции резорцина гуминовыми кислотами, выделенными из сапропеля, можно связать с высоким содержанием аминных групп и развитой удельной поверхностью сорбента. Предельные величины адсорбции резорцина сорбентами на основе сапропеля, рассчитанные по уравнению БЭТ (0,25–1,00 ммоль/г) и уравнению Дубинина-Радushкевича (0,52–2,60 ммоль/г), сопоставимы со значениями предельных величин адсорбции резорцина модифицированными сорбентами (магнитные сорбенты на основе частиц Fe₃O₄, модифицированных гуминовыми кислотами – 0,27–0,61 ммоль/г, углеродными сорбентами ТС-1, АГ-3 – 1,15–3,00 ммоль/г, минеральными сорбентами – 0,55–1,05 ммоль/г).

Проведённое ранее исследование по адсорбции ионов меди(II) сорбентами на основе сапропеля показало следующие результаты: предельные величины адсорбции ионов меди(II) (0,56–1,40 ммоль/г) сорбентами на основе сапропеля, рассчитанные по уравнению БЭТ, сопоставимы со значениями предельных величин адсорбции ионов меди(II) модифицированными сорбентами (углеродные нанотрубки – 0,6 ммоль/г, углеродные сорбент АД-05-2 – 0,8 ммоль/г, модифицированный кремнезём – 1,2 ммоль/г) [14].

Отработанные сорбенты на основе сапропеля можно использовать в производстве строительных материалов (тротуарной плитки, бордюрного камня, стеновых блоков и других строительных изделий).

Заключение

Комплексная очистка сточных вод от различных по природе загрязнителей является актуальной проблемой, и разработка новых

сорбентов имеет большое научное и практическое значение.

Сапропели – возобновляемое природное органическое сырьё. На территории России сапропель встречается практически повсеместно. Возрастание объёмов сапропеля приводит к заболачиванию озёр.

Сапропель, обладая уникальным органоминеральным составом, может служить сырьём для получения дешёвых и эффективных углеродминеральных сорбентов для очистки сточных вод от различных по природе загрязнителей.

На основе сапропеля получены сорбенты: термоокисленный сапропель, гуминовые кислоты, выделенные из сапропеля, модифицированный гуминовыми кислотами термоокисленный сапропель, органоминеральный композиционный материал на основе термоокисленного сапропеля и бентонита.

Установлено, что лимитирующей стадией адсорбции резорцина сорбентами на основе сапропеля является смешанная диффузия.

Адсорбция резорцина в изученном диапазоне концентраций сорбентами на основе сапропеля удовлетворительно описывается кинетическими моделями Лагергрена и Хо и Маккея. Значения энергии активации адсорбции резорцина сорбентами на основе сапропеля (14–28 кДж/моль), рассчитанные по указанным кинетическим моделям, а также термодинамические параметры адсорбции не позволяют разделить вклад физической адсорбции и возможных химических взаимодействий. Механизмом адсорбции резорцина сорбентами на основе сапропеля можно считать:

- полимолекулярную адсорбцию на поверхности сорбентов и физическую адсорбцию за счёт объёмного заполнения микро- и мезопор, а также полостей;

- химическую адсорбцию за счёт образования ковалентных и водородных связей с силикатными и алюмосиликатными группами сорбентов, а также за счёт образования водородных связей с аминогруппами сорбентов.

Предельные величины адсорбции резорцина сорбентами на основе сапропеля, рассчитанные по уравнению БЭТ (0,25–1,00 ммоль/г) и уравнению Дубинина–Радускевича (0,52–2,60 ммоль/г), сопоставимы с другими разработанными сорбентами.

Литература

1. Сазанова М.Л., Сазанов А.В., Жуйкова И.А., Тугаринов Л.В. Химический состав и сорбционная активность сапропелей (обзор) // Теоретическая и прикладная

экология. 2024. № 4. С. 26–36. doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-026-036

2. Юрак В.В., Апакашев Р.А., Лебзин М.С., Малышев А.Н. Композитные сорбенты из природного и техногенного сырья: оптимизация состава для рекультикации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 12-1. С. 177–191. doi: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_177

3. Головина Е.А. Экология в России: современное состояние и актуальные проблемы // AgrarianHistory. 2021. № 8. С. 3–16. doi: 10.52270/27132447_2021_8_3

4. Pradeep N.V., Anupama S., Navya K., Shalini H.N., Idris M., Hampannavar U.S. Biological removal of phenol from wastewaters: a mini review // Appl. Water Sci. 2015. No. 5. P. 105–112. doi: 10.1007/s13201-014-0176-8

5. Villegas L.G.C., Mashhadi N., Chen M., Mukherjee D., Taylor K.E., Biswas N. A short review of techniques for phenol removal from wastewater // Curr. Pollut. Rep. 2016. V. 2. P. 157–167. doi: 10.1007/s40726-016-0035-3

6. Benaddi R., Osmane A., Zidan K., El Harfi K., Ouazzani N. A review on the adsorption of phenol derivatives from wastewater // Ecological Engineering & Environmental Technology. 2023. V. 24. No. 4. P. 35–43. doi: 10.12912/27197050/162059

7. Belaib F., Meniai A.H., Bencheikh Lehocine M. Elimination of phenol by adsorption onto mineral/polyaniline composite solid support // Energy Proc. 2012. V. 18. P. 1254–1260. doi: 10.1016/j.egypro.2012.05.141

8. Николаева Л.А., Айкенова Н.Е. Адсорбционная очистка фенолсодержащих сточных вод нефтеперерабатывающих предприятий // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 4. С. 136–142. doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-136-142

9. Николаева Л.А., Голубчиков М.А. Очистка производственных сточных вод от нефтепродуктов модифицированными сорбционными материалами на основе карбонатного шлама // Водоснабжение и санитарная техника. 2016. № 7. С. 51–58.

10. Беляева О.В., Голубева Н.С., Великанова Е.С., Гора Н.В. Использование новых углеродных адсорбентов для очистки воды от фенола // Техника и технология пищевых производств. 2012. № 1. С. 143–146.

11. Sarker N., Fakhruddin A.N.M. Removal of phenol from aqueous solution using rice straw as adsorbent // Appl. Water Sci. 2017. V. 7. P. 1459–1465. doi: 10.1007/s13201-015-0324-9

12. Daffalla S.B., Mukhtar H., Shaharun M.S. Preparation and characterization of rice husk adsorbents for phenol removal from aqueous systems // PLoS One. 2020. V. 15. No. 12. Article No. e0243540. doi: 10.1371/journal.pone.0243540

13. Зыкова И.В., Исаков В.А., Мишина Н.М. Сорбент для очистки сточных вод от фенолов, нефтепродуктов и тяжёлых металлов на основе термоокисленного сапропеля // Теоретическая и прикладная экология. 2025. № 3. С. 134–141. doi: 10.25750/1995-4301-2025-3-134-141

14. Зыкова И.В., Исаков В.А., Мишина Н.М. Адсорбция ионов меди (II) сорбентами на основе сапропеля // Известия ТулГУ. Естественные науки. 2026. № 1. С. 83–93. doi: 10.24412/2071-6176-2026-1-82-92

15. Hahn S., Kielhorn J., Koppenhöfer J., Wibbertmann A., Mangelsdorf I. Resorcinol. World Health Organization, 2006. 72 p. [Электронный ресурс] <https://iris.who.int/handle/10665/43450> (дата обращения: 01.05.2026).

References

1. Sazanova M.L., Sazanov A.V., Zhuikova I.A., Tugarinov L.V. Chemical composition and sorption activity of sapropels: a review // Theoretical and Applied Ecology. 2024. No. 4. P. 26–36 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-026-036

2. Yurak V.V., Apakashev R.A., Lebzin M.S., Malyshov A.N. Composite sorbents from natural and man-made raw materials: optimization of composition for reclamation // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2023. No. 12-1. P. 177–191 (in Russian). doi: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_177

3. Golovina E.A. Ecology in Russia: current state and current problems // Agrarian History. 2021. No. 8. P. 3–16 (in Russian). doi: 10.52270/27132447_2021_8_3

4. Pradeep N.V., Anupama S., Navya K., Shalini H.N., Idris M., Hampannavar U.S. Biological removal of phenol from wastewaters: a mini review // Appl. Water Sci. 2015. No. 5. P. 105–112. doi: 10.1007/s13201-014-0176-8

5. Villegas L.G.C., Mashhadi N., Chen M., Mukherjee D., Taylor K.E., Biswas N. A short review of techniques for phenol removal from wastewater // Curr. Pollut. Rep. 2016. V. 2. P. 157–167. doi: 10.1007/s40726-016-0035-3

6. Benaddi R., Osmane A., Zidan K., El Harfi K., Ouazzani N. A review on the adsorption of phenol derivatives from wastewater // Ecological Engineering & Environmental Technology. 2023. No. 24. P. 35–43. doi: 10.12912/27197050/162059

7. Belaib F., Meniai A.H., Bencheikh Lehocine M. Elimination of phenol by adsorption onto mineral/polyaniline composite solid support // Energy Proc. 2012. V. 18. P. 1254–1260. doi: 10.1016/j.egypro.2012.05.141

8. Nikolaeva L.A., Aikenova N.E. Adsorption purification of phenol-containing wastewater from oil refineries // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 4. P. 136–142 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-136-142

9. Nikolaeva L.A., Golubchikov M.A. Removal of oil products from industrial wastewater with the use of modified carbonate sludge-based sorption materials // Water supply and sanitary technique. 2016. No. 7. P. 51–58 (in Russian).

10. Belyaeva O.V., Golubeva N.S., Velikanova E.S., Gora N.V. Use of new carbon adsorbents for water cleaning from phenol // Food processing: techniques and technology. 2012. No. 1. P. 143–146 (in Russian).

11. Sarker N., Fakhruddin A.N.M. Removal of phenol from aqueous solution using rice straw as adsorbent // Appl. Water Sci. 2017. V. 7. P. 1459–1465. doi: 10.1007/s13201-015-0324-9

12. Daffalla S.B., Mukhtar H., Shaharun M.S. Preparation and characterization of rice husk adsorbents for phenol removal from aqueous systems // PLoS One. 2020. V. 15. No. 12. Article No. e0243540. doi: 10.1371/journal.pone.0243540

13. Zyкова И.В., Исаков В.А., Мишина Н.М. Сорбент на основе термально окисленного сапропеля для очистки сточных вод от фенолов, нефтепродуктов и тяжелых металлов // Теоретическая и прикладная экология. 2025. No. 3. P. 134–141 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2025-3-134-141

14. Zyкова И.В., Исаков В.А., Мишина Н.М. Adsorption of copper(II) ions by sapropel-based sorbents // Izvestiya TulGU. Natural sciences. 2026. No. 1. P. 83–93 (in Russian). doi: 10.24412/2071-6176-2026-1-82-92

15. Hahn S., Kielhorn J., Koppenhöfer J., Wibbertmann A., Mangelsdorf I. Resorcinol. World Health Organization, 2006. 72 p. [Internet resource] <https://iris.who.int/handle/10665/43450> (Accessed: 01.05.2026).