

## Электронный дополнительный материал

УДК 66.081.2:544.723.5

### ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА СОРБЦИИ ИОНОВ $\text{Cu}^{2+}$ , $\text{Co}^{2+}$ И $\text{Mn}^{2+}$ НА МОДИФИЦИРОВАННОМ ПРИРОДНОМ ПОЛИМЕРЕ – ПЕКТИНЕ\*

© Р.Х. Мударисова<sup>1\*\*</sup>, О.С. Куковинец<sup>2</sup>, А.Ф. Сагитова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Уфимский институт химии УФИЦ РАН, пр. Октября, 71, Уфа, 450054, Россия,  
mударисова@anrb.ru

<sup>2</sup> Уфимский университет науки и технологий, ул. Мингажева, 100, Уфа, 450078,  
Россия

---

\* Полный текст статьи опубликован: Мударисова Р.Х., Куковинец О.С., Сагитова А.Ф. Изучение механизма сорбции ионов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$  и  $\text{Mn}^{2+}$  на модифицированном природном полимере – пектине // Химия растительного сырья. 2024. №1. С. 111–123. DOI: 10.14258/jcprtm.20240112308.

\*\* Автор, с которым следует вести переписку.

**Физико-химические характеристики пектиновых сорбентов:**

Пектин. Найдено, %: С 40.3; Н 5.5; Вычислено, %: С 42.1; Н 4.9;  $W = 0.63 \text{ см}^3/\text{г}$ ;  $S_{\text{уд (теор.)}} = 210.8 \text{ м}^2/\text{г}$ ;  $D = 1.79 \text{ мкм}$ ;  $[\eta] = 2.3 \text{ дл/г}$ ;  $pK_a = 4.5$ ; свободные  $\text{COOH}$ -группы 7.65%;  $l_{\text{max}} 210 \text{ нм}$ ;  $a_{\text{D},(\text{H}_2\text{O})}^{20} + 180 \pm 2 \text{ град} \cdot \text{см}^3/\text{дм} \cdot \text{г}$ .

ПК-СК. Найдено, %: С 47.2; Н 5.0; Вычислено, %: С 46.2; Н 4.6;  $W = 0.90 \text{ см}^3/\text{г}$ ;  $S_{\text{уд (теор.)}} = 240.8 \text{ м}^2/\text{г}$ ;  $D = 0.71 \text{ мкм}$ ;  $[\eta] = 0.9 \text{ дл/г}$ ;  $pK_a = 2.5$ ; свободные  $\text{COOH}$ -группы 5.54 %;  $l_{\text{max}} 303 \text{ нм}$ ;  $a_{\text{D},(\text{H}_2\text{O})}^{20} + 84 \pm 2 \text{ град} \cdot \text{см}^3/\text{дм} \cdot \text{г}$ .

ПК-АК. Найдено, %: С 46.0; Н 5.2; N 4.9. Вычислено, %: С 44.4; Н 4.7; N 3.5;  $W = 0.75 \text{ см}^3/\text{г}$ ;  $S_{\text{уд (теор.)}} = 228.7 \text{ м}^2/\text{г}$ ;  $D = 1.08 \text{ мкм}$ ;  $[\eta] = 1.1 \text{ дл/г}$ ;  $pK_a = 3.9$ ; свободные  $\text{COOH}$ -группы 7.56 %;  $l_{\text{max}} 304 \text{ нм}$ ;  $a_{\text{D},(\text{H}_2\text{O})}^{20} + 47 \pm 1 \text{ град} \cdot \text{см}^3/\text{дм} \cdot \text{г}$ .

ПК-5АСК. Найдено, %: С 45.3; Н 5.0; N 5.0. Вычислено, %: С 44.3; Н 4.9; N 3.4;  $W = 0.77 \text{ см}^3/\text{г}$ ;  $S_{\text{уд (теор.)}} = 219.2 \text{ м}^2/\text{г}$ ;  $D = 0.84 \text{ мкм}$ ;  $[\eta] = 0.8 \text{ дл/г}$ ;  $pK_a = 3.6$ ; свободные  $\text{COOH}$ -группы 7.25 %;  $l_{\text{max}} 310 \text{ нм}$ ;  $a_{\text{D},(\text{H}_2\text{O})}^{20} + 52 \pm 2 \text{ град} \cdot \text{см}^3/\text{дм} \cdot \text{г}$ .

ПК-НК. Найдено, %: С 44.8; Н 4.8; N 5.4. Вычислено, %: С 42.9; Н 4.2; N 3.6;  $W = 0.87 \text{ см}^3/\text{г}$ ;  $S_{\text{уд (теор.)}} = 218.2 \text{ м}^2/\text{г}$ ;  $D = 1.40 \text{ мкм}$ ;  $[\eta] = 3.5 \text{ дл/г}$ ;  $pK_a = 4.1$ ; свободные  $\text{COOH}$ -группы 6.17 %;  $l_{\text{max}} 265 \text{ нм}$ ;  $a_{\text{D},(\text{H}_2\text{O})}^{20} + 115 \pm 2 \text{ град} \cdot \text{см}^3/\text{дм} \cdot \text{г}$ .

Таблица 1. Сорбционные характеристики пектиновых сорбентов по отношению к ионам  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ 

Показатель	Полисахаридная матрица				
	ПК	ПК-СК	ПК-АК	ПК-5АСК	ПК-НК
R ( $\text{Cu}^{2+}$ ), %	83.0	95.5	84.4	85.7	83.6
Аэксп, ммоль/г (мг/г)	1.66 (105.4)	1.91 (121.3)	1.69 (107.3)	1.71 (108.6)	1.67 (106.0)
t, мин	60	10	45	15	45
R ( $\text{Co}^{2+}$ ), %	79.5	89.1	86.7	80.1	87.2
Аэксп, ммоль/г (мг/г)	1.59 (93.7)	1.78 (104.9)	1.73 (101.9)	1.60 (94.3)	1.74 (102.5)
t, мин	60	45	40	45	45
R ( $\text{Mn}^{2+}$ ), %	74.4	86.0±	85.2	80.1	74.5
Аэксп, ммоль/г (мг/г)	1.49 (81.9)	1.72 (94.6)	1.70 (93.5)	1.60 (88.0)	1.49 (81.9)
t, мин	120	90	90	90	60

Таблица 2. Термодинамические параметры сорбции ионов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$  и  $\text{Mn}^{2+}$  пектиновыми сорбентами

Соединение	$\Delta H^{\circ}_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S^{\circ}_{298}$ , Дж/моль·К	$\Delta G^{\circ}_{298}$ , кДж/моль
ПК- $\text{Cu}^{2+}$	-6.2±0.2	35.9±0.8	-16.7±0.4
ПК-СК- $\text{Cu}^{2+}$	-27.2±0.5	-27.9±0.7	-19.0±0.2
ПК-АК- $\text{Cu}^{2+}$	-4.7±0.1	41.8±0.2	-16.9±0.2
ПК-5АСК- $\text{Cu}^{2+}$	-10.4±0.5	22.4±0.6	-16.9±0.2
ПК-НК- $\text{Cu}^{2+}$	-11.7±0.2	16.3±0.4	-16.5±0.3
ПК- $\text{Co}^{2+}$	-34.9±0.5	-68.3±0.8	-14.9±0.5
ПК-СК- $\text{Co}^{2+}$	-31.5±0.5	-46.5±0.4	-17.8±0.4
ПК-АК- $\text{Co}^{2+}$	-21.1±0.6	-14.0±0.6	-17.0±0.1
ПК-5АСК- $\text{Co}^{2+}$	-22.7±0.5	-25.2±0.4	-15.4±0.2
ПК-НК- $\text{Co}^{2+}$	-36.9±0.2	-68.8±0.3	-16.7±0.5
ПК- $\text{Mn}^{2+}$	-24.3±0.5	-26.8±0.4	-16.4±0.1
ПК-СК- $\text{Mn}^{2+}$	-48.7±0.4	-113.7±0.7	-15.4±0.2
ПК-АК- $\text{Mn}^{2+}$	-45.6±0.6	-100.5±0.5	-16.2±0.3
ПК-5АСК- $\text{Mn}^{2+}$	-37.5±0.7	-74.0±0.6	-15.7±0.5
ПК-НК- $\text{Mn}^{2+}$	-23.4±0.5	-29.5±0.7	-14.7±0.2

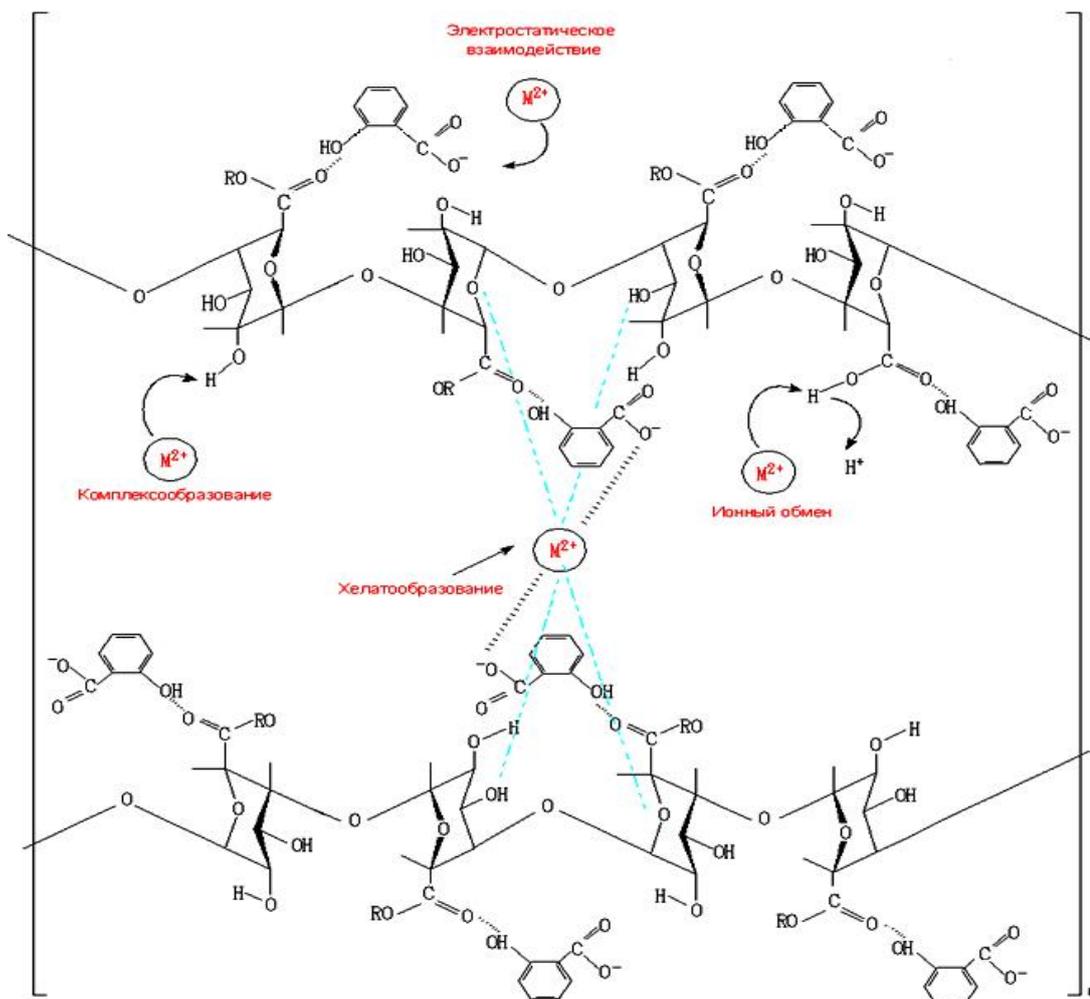


Рис. 1. Предполагаемая схема взаимодействия ионов  $\text{M}^{2+}$  ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$  и  $\text{Mn}^{2+}$ ) с модифицированным пектином на примере салициловой кислоты

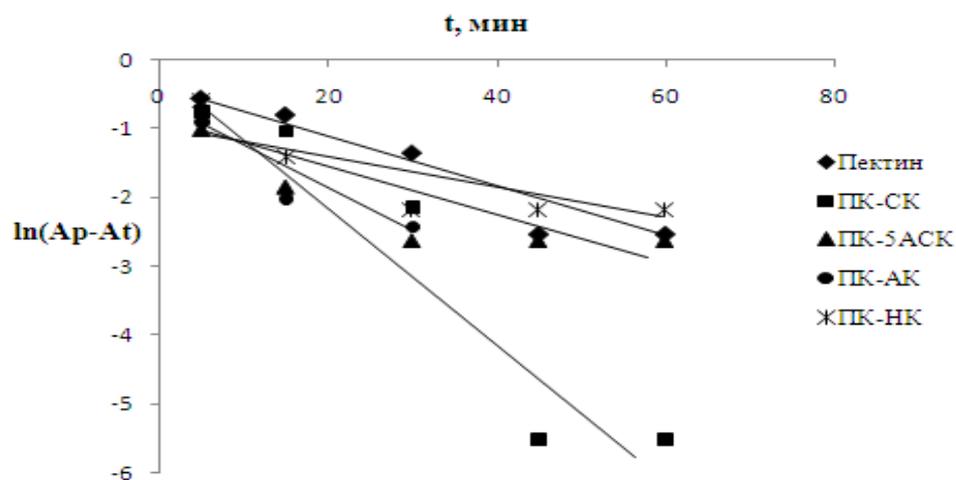


Рис. 2. Анаморфозы кинетических кривых сорбции ионов  $\text{Co}^{2+}$  модифицированными пектинами в координатах уравнений, описывающих реакции псевдопервого порядка

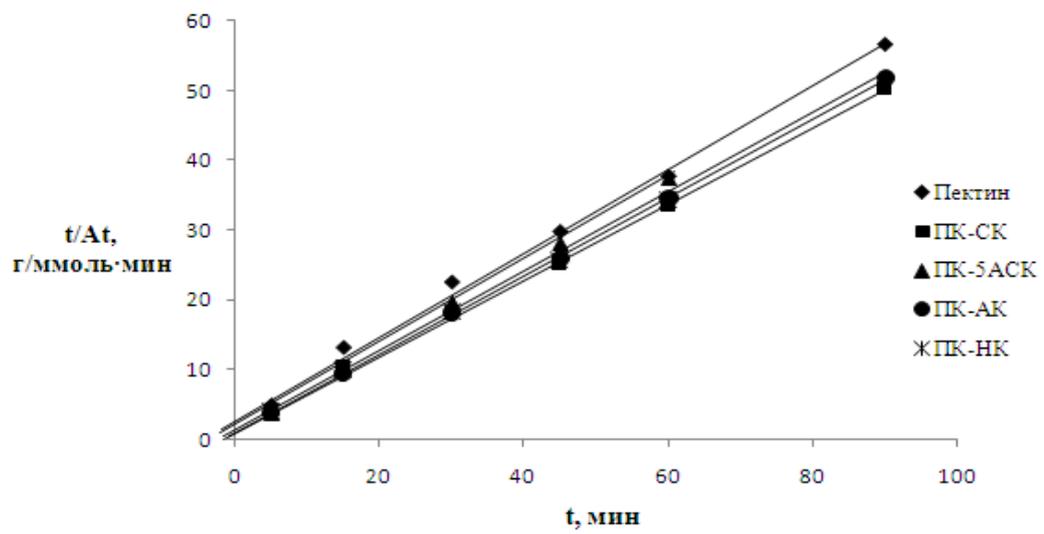


Рис. 3. Анаморфозы кинетических кривых сорбции ионов  $\text{Co}^{2+}$  модифицированными пектинами в координатах уравнений, описывающих реакции псевдвторого порядка