

## ВЛИЯНИЕ ТЕКСТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОДНЫХ ПОДЛОЖЕК ПРЕПАРАТОВ КЛАСТЕРНОГО СЕРЕБРА НА ПОДАВЛЕНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОЙ МИКРОФЛОРЫ

© 2019 г. С. С. Хохлов<sup>1\*</sup>, И. И. Ходос<sup>2</sup>, Л. Г. Дьячкова<sup>1</sup>,  
А. В. Куткин<sup>1</sup>, В. С. Григорьев<sup>3</sup>, А. В. Рошин<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Государственный научно-исследовательский институт органической химии и технологии, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов  
Российской академии наук, Черноголовка, Россия

<sup>3</sup>Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: kho-kh@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.11.2018;

после доработки 22.02.2019;

принята в печать 20.03.2019

Исследована взаимосвязь между текстурными характеристиками углеродных подложек и биоактивностью препаратов на их основе, импрегнированных наночастицами кластерного серебра. Выполнен комплекс физико-химических исследований углеродных сорбентов двух различных типов, использованных в качестве подложек с применением технологии получения перспективных биопрепаратов кластерного (нуль-валентного) серебра. Измерены низкотемпературные (77 К) изотермы адсорбции–десорбции азота на поверхности подложек и определены различными адсорбционными методами (Langmuir, BET, Horwath–Kavazoe, t-Plot) текстурные характеристики пористой структуры сорбентов. Методом просвечивающей электронной микроскопии исследованы морфологические характеристики сорбентов, включая размер и топографию частиц кластерного серебра на их поверхности. Установлена взаимосвязь между текстурными характеристиками углеродных подложек и способностью биопрепаратов кластерного серебра на основе этих подложек подавлять бактериальную микрофлору. На основании полученных результатов обоснован подход к выбору оптимальной углеродной подложки для создания биоактивных препаратов кластерного серебра.

**Ключевые слова:** активированный уголь, расширенный графит, изотерма адсорбции, электронограммы, кластерное серебро, биоцидные препараты, текстурные характеристики.

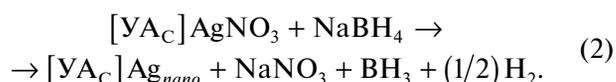
**DOI:** 10.1134/S0207401X19110050

### ВВЕДЕНИЕ

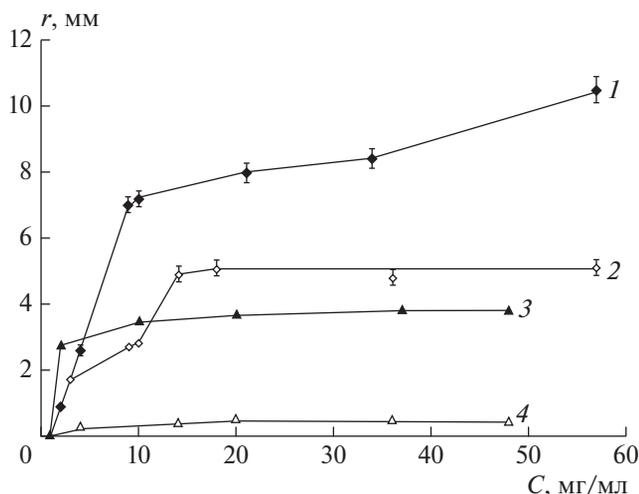
В последнее время в наноиндустрии и водообработке приобрели популярность препараты на основе кластерного серебра, нанесенного на поверхность различных материалов. К ним относятся, в частности, бактерицидные добавки пролонгированного действия, вводимые в резинотехнические и полимерные изделия, в том числе в изделия пищевого назначения [1].

Однако влияние типа и структурных характеристик подложек (адсорбентов) на активность препаратов в литературе мало изучено. Вместе с тем правомерно ожидать и различной биоактивности препаратов кластерного серебра, создаваемых на основе адсорбентов, поскольку в качестве подложки могут быть использованы адсорбенты различной природы со структурой, изменяющей-

ся в широких пределах: их удельная поверхность может варьироваться в диапазоне значений от 600 до 2000 м<sup>2</sup>/г, объем пор – от 0.2 до 1.2 см<sup>3</sup>/г, а их линейные размеры могут колебаться в интервале от 6 до 2000 нм [2, 3]. Действительно, как было показано в работах [4, 5], препараты, содержащие наночастицы кластерного серебра общей формулы УА<sub>С</sub>Ag<sub>nano</sub> (где УА<sub>С</sub> – углеродный адсорбент), полученные прямым синтезом на углеродных носителях по приведенным ниже схемам, проявляли различную биоактивность:



В работах [4, 5] в качестве углеродных подложек применяли адсорбенты типа березового активи-



**Рис. 1.** Радиус ( $r$ , мм) зон подавления роста культуры *Azotobacter vinelandii* препаратом  $\text{РГ}_{\text{ф}}\text{Ag}_{\text{nano}}$  (кривая 1), препаратом  $([\text{BAU-A}]\text{Ag}_{\text{nano}})$  (кривая 2) и культуры *Bacillus licheniformis* препаратом  $\text{РГ}_{\text{ф}}\text{Ag}_{\text{nano}}$  (кривая 3) и препаратом  $([\text{BAU-A}]\text{Ag}_{\text{nano}})$  (кривая 4).

рованного угля (БАУ-А) или фторсодержащего расширенного графита ( $\text{РГ}_{\text{ф}}$ ).

Из данных, представленных на рис. 1, следует, что препарат на основе фторсодержащего расширенного графита ( $\text{РГ}_{\text{ф}}\text{Ag}_{\text{nano}}$ ) обладал достаточно высокой бактерицидной активностью в отношении грамположительной культуры бактерий *Bacillus licheniformis* (кривая 2) и грамотрицательной культуры *Azotobacter vinelandii* (кривая 1). Несмотря на приблизительно такое же содержание наноразмерных частиц серебра, как и в ( $\text{РГ}_{\text{ф}}\text{Ag}_{\text{nano}}$ ), препарат на основе активного березового угля ( $([\text{BAU-A}]\text{Ag}_{\text{nano}})$ ) был менее активным. Он проявил активность в отношении грамотрицательной культуры *Azotobacter vinelandii* (кривая 3), хотя эта активность оказалась в 2.2 раза ниже, чем у ( $\text{РГ}_{\text{ф}}\text{Ag}_{\text{nano}}$ ); при этом ( $([\text{BAU-A}]\text{Ag}_{\text{nano}})$ ) практически не подавлял рост грамположительной культуры *Bacillus licheniformis* (кривая 4). Таким образом, экспериментально было продемонстрировано, что в идентичных условиях и при одинаковой концентрации серебра на разных углеродных подложках наблюдаются значительные различия в активности биопрепаратов.

Можно предположить, что полученные результаты обусловлены особенностью строения пористых структур углеродных подложек, использованных для синтеза препаратов. Ввиду этого целью настоящего исследования была оценка влияния пористой структуры углеродных адсорбентов БАУ-А и  $\text{РГ}_{\text{ф}}$  на бактериостатическую активность препаратов на их основе, импрегнированных наночастицами кластерного серебра.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез биопрепаратов на основе кластерного серебра, нанесенного на углеродную подложку, подробно описан в работе [4]. Там же приведено описание методов определения бактериостатической активности препаратов.

Для оценки текстурных характеристик пористой структуры подложек (адсорбентов БАУ-А и  $\text{РГ}_{\text{ф}}$ ) выполнены исследования на автоматическом адсорбционном анализаторе ASAP 2020 V4.00 [6]. Были измерены низкотемпературные изотермы адсорбции и десорбции азота на БАУ-А и  $\text{РГ}_{\text{ф}}$ . Сорбционную емкость измеряли при 77 К объемным статистическим методом в диапазоне относительных равновесных давлений  $P/P_0$  от  $10^{-7}$  до 1.0. Равновесие считалось достигнутым в течение 18–20 с, когда изменение остаточного давления в газовой фазе не превышало 2%. Принцип измерения изотерм основан на адсорбции и десорбции газов на внешней и внутренней поверхностях (в порах) углеродных образцов. Исследуемый образец сорбента помещали в ампулу и дегазировали в вакууме  $10^{-7}$  кПа при  $400^\circ\text{C}$ . Затем ампулу охлаждали до температуры кипения азота (77 К) и заполняли азотом до остаточного давления  $P = 10^{-7}$  кПа. Для получения последующих точек изотермы остаточное давление постепенно увеличивали вплоть до образования капиллярной конденсации в области парового пространства при давлении  $P = 133$  кПа. С помощью программного обеспечения прибора ASAP 2020 V4.00 по остаточному давлению, температуре и объему ампулы рассчитаны координаты точек изотерм низкотемпературной адсорбции и десорбции азота на БАУ-А и  $\text{РГ}_{\text{ф}}$ . Таким образом, изотермы адсорбции–десорбции азота были измерены во всем интервале изменения  $P/P_0$ , включая капиллярно-конденсационный гистерезис в мезо- и макропорах. Допускаемый предел относительной погрешности прибора при измерении удельной площади поверхности составляет  $\pm 2.5\%$ , диаметра пор –  $\pm 5\%$ , удельного объема пор –  $\pm 5\text{--}10\%$  [6].

Структуру адсорбентов, элементный состав образцов и размер частиц кластерного серебра исследовали с помощью просвечивающих электронных микроскопов (ПЭМ) JEM-2000FX и JEM-2100 при ускоряющих напряжениях 150 и 200 кВ. Элементный состав образцов определяли, используя рентгеновский энергодисперсионный микроанализатор микроскопа JEM-2000FX. Изображения прямого разрешения решетки получали на микроскопе JEM-2100 с разрешающей способностью, равной 0.19 нм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Текстурные характеристики подложек, полученные на основе адсорбционных исследований**

Изотермы адсорбции–десорбции азота при температуре 77 К для двух исследованных типов углеродных подложек представлены на рис. 2, 3. Согласно общепринятой ИЮПАК классификации БВВТ, изотерму адсорбции азота, измеренную на БАУ-А (рис. 2), следует отнести к IV типу изотерм [3]. Изотерма характеризуется высоким подъемом в области низкого давления  $P/P_0 = 5 \cdot 10^{-7}$ –0.06 с последующим изломом, переходящим в участок линейной зависимости и наличием петли гистерезиса при  $P/P_0 = 0.4$ –1.0. Достаточная крутизна излома изотермы с последующим переходом в участок с линейной зависимостью позволяет аппроксимировать линейный участок в области  $P/P_0 = 0.06$ –0.10 прямой линией и графически рассчитать удельную поверхность  $S$ . Для этого по уравнению БЭТ, выраженному в линейной форме

$$\frac{P/P_0}{a(1-P/P_0)} = \frac{1}{a_m C} + \frac{C-1}{a_m C P/P_0}, \quad (3)$$

была построена изотерма адсорбции линейного участка в координатах  $\left(\frac{P/P_0}{a(1-P/P_0)}, \frac{P}{P_0}\right)$ . По отрезку прямой, отсекаемой на оси ординат ( $y = 5.0$  моль/г), была найдена величина емкости монослоя  $a_m = 8.7 \cdot 10^{-3}$  моль/г. При этом удельная поверхность БАУ-А, рассчитанная по уравнению

$$S = a_m N \omega, \quad (4)$$

составила  $S = 848.46$  м<sup>2</sup>/г, где  $a_m$  – емкость монослоя, моль/г;  $N$  – число Авогадро;  $\omega$  – площадь молекулы азота, равная  $16.2 \cdot 10^{-20}$  м<sup>2</sup>.

По углу наклона изотермы к оси абсцисс ( $\alpha = 113.44$  моль/г) рассчитано значение константы  $C = 76.63$  уравнения БЭТ, которая в виде адсорбционного потенциала сорбента симбатно отражает чистую теплоту адсорбции азота в первом слое. Адекватность расчета текстурных характеристик БАУ-А по методу БЭТ косвенно подтверждена близкими значениями поверхности сорбента, вычисленными по методам Langmuir ( $S = 949.27$  м<sup>2</sup>/г) и t-Plot ( $S = 829.94$  м<sup>2</sup>/г) [3].

Объем микропор в БАУ-А был определен по уравнению ТОЗМ [7], хорошо описывающему области малого и среднего давления изотермы адсорбции

$$a = \frac{W}{v^*} \exp \left\{ - \left( \frac{A}{\beta E_0} \right)^n \right\}, \quad (5)$$

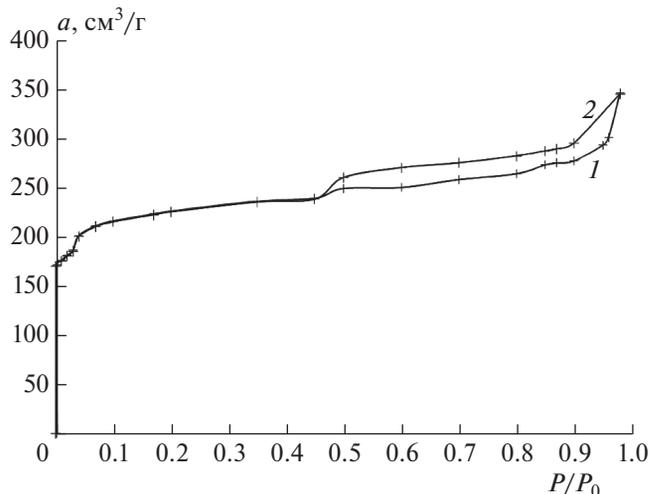


Рис. 2. Изотермы адсорбции (1) и десорбции (2) азота (77 К) на сорбенте БАУ-А.

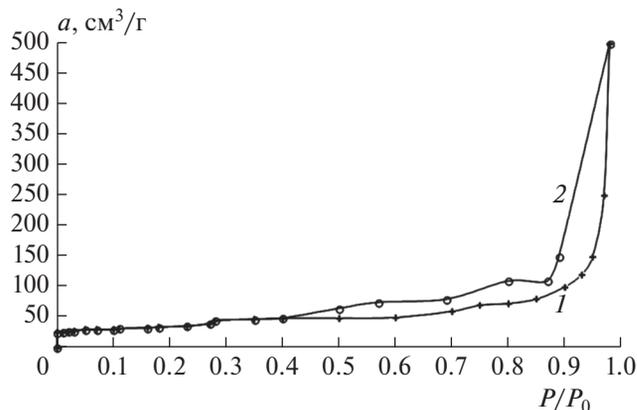


Рис. 3. Изотермы адсорбции (1) и десорбции (2) азота (77 К) на сорбенте РГφ.

где  $a$  – величина адсорбции при относительном равновесном давлении  $P/P_0$  и температуре  $T$ , ммоль/г;  $W$  – объем микропор, см<sup>3</sup>/г;  $v^*$  – мольный объем азота при 77 К (34.6 см<sup>3</sup>/моль);  $A = RT \ln(P/P_0)$  – дифференциальная мольная работа адсорбции;  $R$  – газовая постоянная;  $\beta$  – коэффициент подобия;  $E_0$  – характеристическая энергия адсорбции;  $n$  – целочисленный параметр.

По уравнению (5), выраженному в линейной форме в области относительных давлений  $P/P_0 = 0.06$ –0.10, при значении  $n = 2$  в координатах

$$\ln a = \left[ \ln \frac{W}{v^*} \right], \quad [(\ln P/P_0)^2]$$

построена изотерма, отсекающая на оси ординат отрезок  $b$ . Из соотношения  $b = \ln(W_0/v^*)$  вычислена величина  $W_0 = 0.242$  см<sup>3</sup>/г.

Таблица 1. Текстурные характеристики углеродных адсорбентов

Адсорбент	Общая удельная поверхность, (БЭТ) $S$ , м <sup>2</sup> /г	Средний диаметр мезопор (макропор) $d$ , нм	Удельная поверхность мезопор (макропор) $S$ , м <sup>2</sup> /г	Объем микропор, $W$ , см <sup>3</sup> /г,	Средний диаметр ультрапор (микропор) $d$ , нм	Константа $C$ уравнения БЭТ
БАУ-А	848.46	(31.0)	(166.46)	0.242	0.459; (0.630)	76.73
РГ <sub>ф</sub>	124.34	3.20	78.9	0.028	0.80	18.47

Удельная поверхность макропор  $S_{\text{мак}} = 164.94$  м<sup>2</sup> вычислена по разности между общей удельной поверхностью адсорбента и условной удельной поверхностью микропор ( $S_{\text{мик}}$ ):

$$S_{\text{мак}} = S_{\text{общ}} - S_{\text{мик}}$$

Условная удельная поверхность микропор была рассчитана по формуле

$$S_{\text{мик}} = \frac{W}{v^*} N \omega$$

Измеренная изотерма адсорбции азота на РГ<sub>ф</sub> (рис. 3) имеет крутой изломом в области низкого давления  $P/P_0 = 0.01-0.05$ , вогнутый участок в интервале  $P/P_0 = 0.05-0.36$  и наличие обширной петли гистерезиса в интервале  $P/P_0 = 0.36-1.0$ . Обширная петля гистерезиса указывает на развитую мезопористую структуру сорбента, а ее начало в интервале  $P/P_0 < 0.4$  – на щелевидную форму пор. По классификации БВВТ эту изотерму (рис. 3) можно отнести к V типу [3]. Аналогично по приведенным выше схемам расчета удельной поверхности (3)–(5) был выполнен расчет для второго типа подложки – РГ<sub>ф</sub>. По отрезку, отсекаемой прямой на оси ординат ( $y = 30.333$  моль/г), рассчитана величина емкости монослоя ( $a_m = 1.75 \cdot 10^{-3}$  моль/г), а по углу наклона прямой к оси абсцисс ( $\alpha = 0.033116$  моль/г) – значение константы  $C = 18.468$ . Удельная поверхность РГ<sub>ф</sub>, рассчитанная по уравнению (4), составила  $S = 124.34$  м<sup>2</sup>/г. Расчет поверхности РГ<sub>ф</sub> по уравнению Langmuir дал значение  $S_{\text{общ}} = 160.53$  м<sup>2</sup>/г, т.е. разность в определении удельной величины поверхности РГ<sub>ф</sub> различными методами составила  $\Delta S = \pm 12.8\%$ .

Небольшой подъем изотермы в области низких давлений и малая величина константы  $C = 18.468$  свидетельствуют о слабо развитой микропористой структуре и низком адсорбционном потенциале сорбента РГ<sub>ф</sub>. Данный тип изотерм характерен для систем с очень слабым энергетическим потенциалом взаимодействия адсорбент–адсорбат. Аналогично вышеприведенному примеру расчета объема микропор для БАУ-А был рассчитан

объем микропор для РГ<sub>ф</sub>, который составил  $W = 0.0286$  см<sup>3</sup>/г, а поверхность мезопор  $S_{\text{мез}} = 78.9$  м<sup>2</sup>.

#### **Расчет распределения пор по размерам в БАУ-А и РГ<sub>ф</sub> на основании полученных изотерм адсорбции**

Важной текстурной характеристикой, определяющей адсорбционный потенциал сорбента (потенциал адсорбции возрастает с уменьшением радиуса пор), является распределение пор по размерам и соотношение объемов микро- и мезопор в сорбенте. Изотермы на рис. 2, 3 относятся к IV и V типам и позволяют рассчитать распределение пор по размерам без учета толщины адсорбционного слоя:

$$r_k = \frac{-2\gamma V_m}{RT \ln(P/P_0)}, \quad (6)$$

где  $r_k$  (Å) – радиус поры;  $\gamma = 8.85$  эрг/см<sup>2</sup> – поверхностное натяжение азота при 77 К;  $V_m = 34.7$  см<sup>3</sup>/моль – молярный объем жидкого азота;  $R = 83.14$  эрг/(моль · К).

С использованием программного обеспечения анализатора ASAP 2020 V4.00 по методу Horvath–Kavazoe [8, 9], учитывающему толщину  $t$  адсорбционного слоя по уравнению де Бура

$$t[\text{Å}] = \left[ \frac{13.99}{\lg(P/P_0) + 0.0034} \right]^{1/2}, \quad (7)$$

и по параметрам полученных изотерм (рис. 2, 3) выполнен расчет распределения пор по размерам в БАУ-А и РГ<sub>ф</sub>, исходя из модели щелевидной формы пор. Результаты расчета представлены в табл. 1.

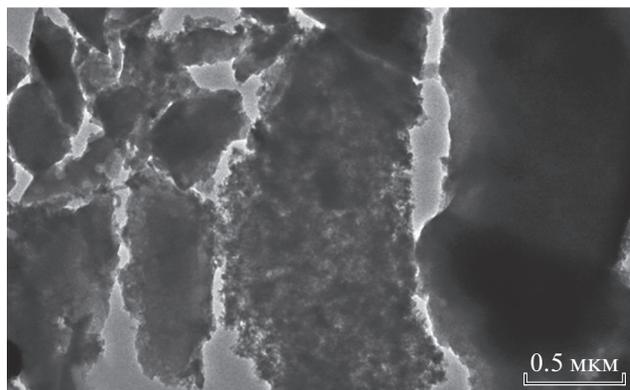
Как следует из данных, представленных в табл. 1, сорбент БАУ-А характеризуется развитой микропористой структурой с относительно большой (для активированных углей) удельной долей поверхности макропор (19.6%). Текстурная характеристика БАУ-А, характеризующаяся отсутствием мезопор, наличием ультрамикропор и развитой поверхностью макропор, является нетипичной для большинства активированных углей.

Пористая структура сорбента  $РГ_{\phi}$  кардинально отличается от структуры БАУ-А:  $РГ_{\phi}$  не содержит пор, соизмеримых с размерами частиц серебра, а доля объема микропор в нем составляет 11.6% от объема микропор в БАУ-А. Соответственно, поскольку энергетический потенциал микропор существенно выше энергетического потенциала макро- и мезопор, то и энергетический потенциал поверхности БАУ-У в целом оказался существенно выше энергетического потенциала поверхности  $РГ_{\phi}$ . Это подтверждается расчетными значениями констант  $C$  уравнения БЭТ (табл. 1) – энергетический потенциал БАУ-У по этому параметру оказался в 4.15 раз выше энергетического потенциала  $РГ_{\phi}$ .

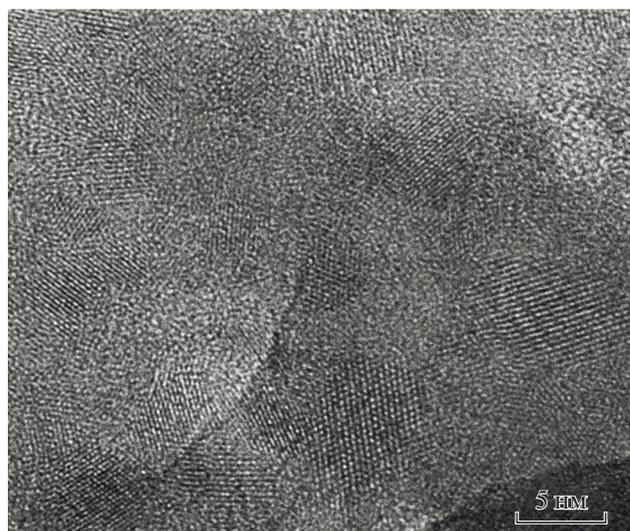
### *Результаты исследования адсорбентов с помощью просвечивающего электронного микроскопа*

Для установления взаимосвязи тип подложки – биоактивность препарата с помощью ПЭМ были исследованы также морфологическая структура подложек, размер и топография кластерных частиц серебра на подложках. На микрофотографии исходного образца БАУ-А видно, что его поверхность представляет собой структуру, образованную конгломератами, состоящими из глобул (рис. 4). Вследствие этого образец имеет негладкую, пористую поверхность. Изображения прямого разрешения кристаллической решетки показывают, что микрочастицы состоят из разориентированных наноразмерных областей микрочастиц графита, плоскость (0001) которых параллельна поверхности подложки (рис. 5). Частицы кластерного серебра ( $d \approx 6.0–10.0$  нм), адсорбировавшиеся в макропорах на поверхности БАУ-А, показаны на рис. 6. Наличие серебра подтверждается рентгеновским энергодисперсионным микроанализом, выполненным с помощью ПЭМ. На рис. 7 приведена часть спектра, содержащего линии характеристического излучения серебра.

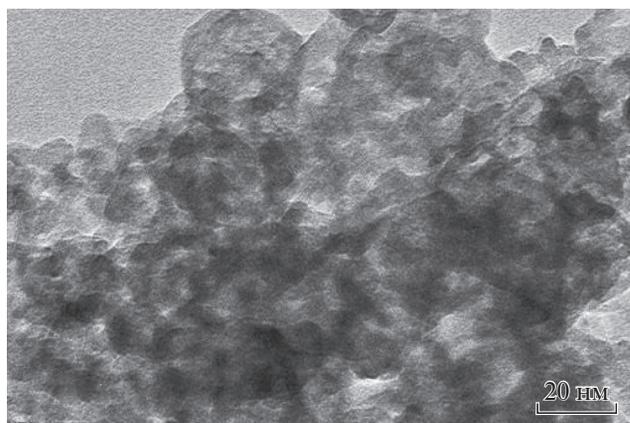
Результаты исследования с помощью ПЭМ указывают на то, что частицы серебра внедрены в макропоры – промежутки между соприкасающимися глобулами. Таким образом, текстурную модель БАУ-А следует рассматривать как бидисперсную структуру, состоящую из макропор, образовавшихся в промежутках соприкасающихся глобул и ультра- и микропор микрочастиц, образующих глобулы. При этом из сравнения размеров микропор ( $d = 0.686$  нм) и макропор ( $d \approx 60.0–80.0$  нм) образца БАУ-А с размером частиц серебра 6.0–10.0 нм следует, что макропоры БАУ-А недоступны для проникновения в них Ag. Из полученных микрофотографий ПЭМ и соотношения размеров частиц Ag и макропор (1 : 6) следует, что адсорбция Ag на поверхности БАУ-А происходит в



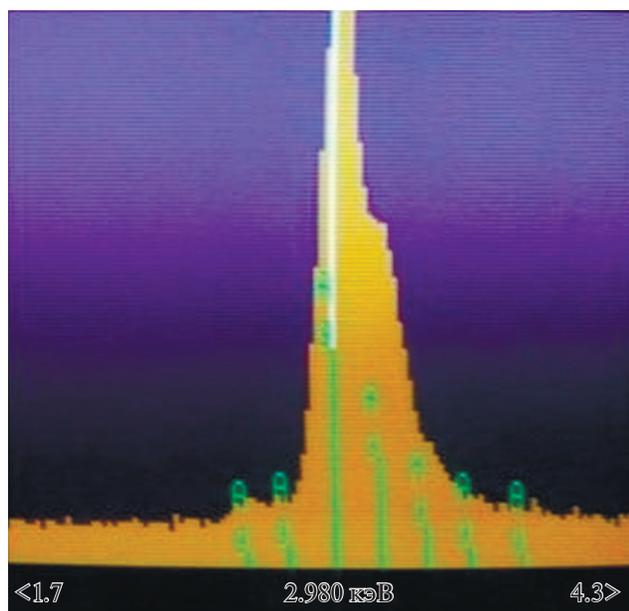
**Рис. 4.** Изображение ПЭМ структуры исходного сорбента БАУ-А.



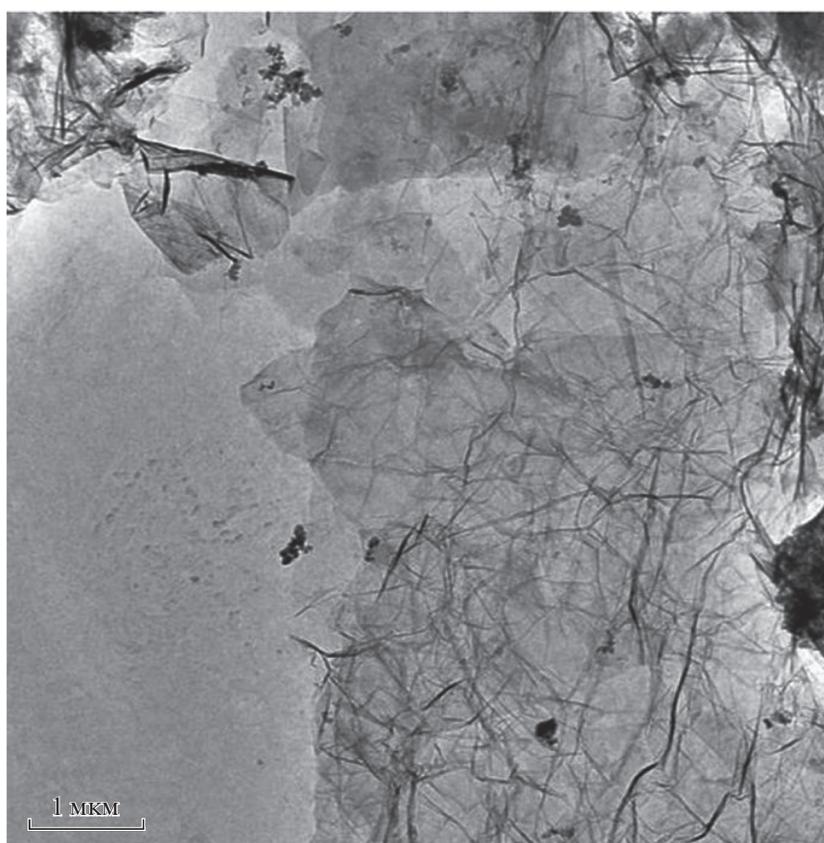
**Рис. 5.** Изображение ПЭМ кристаллической решетки микрочастицы БАУ-А.



**Рис. 6.** Изображение ПЭМ поверхности БАУ-А, импрегнированной наночастицами серебра.



**Рис. 7.** Линии характеристического излучения серебра в рентгеновском спектре энергодисперсионного микроанализа поверхности сорбента БАУ-А.



**Рис. 8.** Изображение ПЭМ поверхности исходного сорбента PГ<sub>ф</sub>.

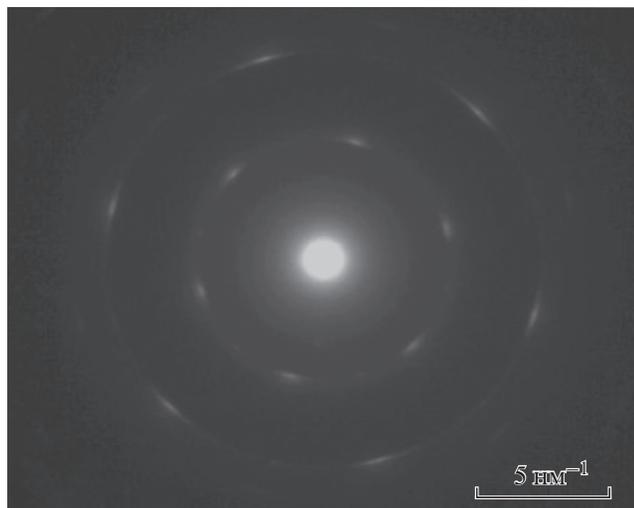


Рис. 9. Электронограмма микрочастицы сорбента РГ<sub>ф</sub>.

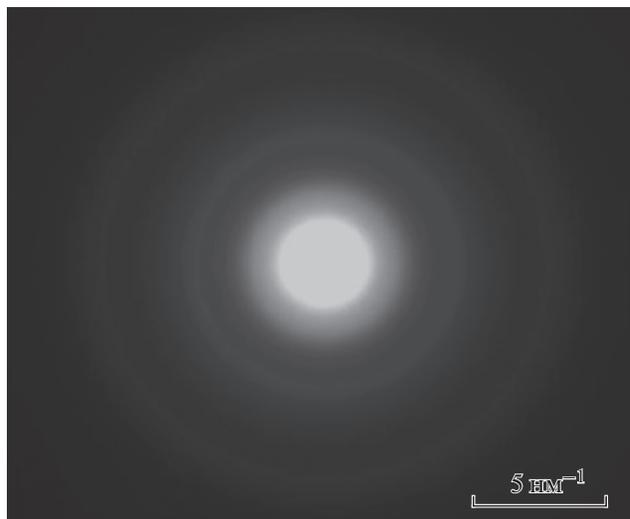


Рис. 10. Электронограмма микрочастицы сорбента БАУ-А.

основном в макропорах (в промежутках между соприкасающимися глобулами).

В отличие от поверхности микрочастиц БАУ-А поверхность частиц исходного образца сорбента РГ<sub>ф</sub> существенно более гладкая (рис. 8). Это связано с тем, что частицы образца расширенного графита значительно крупнее частиц БАУ: их размер достигает 1 мкм. Об этом свидетельствует электронограмма на рис. 9, полученная для области образца РГ<sub>ф</sub> площадью около 1 мкм<sup>2</sup>. Электронограмма показывает монокристаллическое состояние этой области, так как она образована точечными рефлексами, расположение которых соответствует ориентации плоскости (0001) графита перпендикулярно электронному пучку (с некоторым разбросом азимутальной ориентации отдельных структурных блоков при сохранении нормали 0001). В противоположность рис. 9 электронограмма на рис. 10 для образца БАУ-А состоит из сплошных размытых колец, что соответствует хаотично ориентированным нанокристаллам, образующим микрочастицу этого образца.

Микрофотография поверхности сорбента РГ<sub>ф</sub>, импрегнированного частицами серебра, представлена на рис. 11. Изображение ПЭМ показывает, что распределение частиц Ag размером  $d \approx 16\text{--}26$  нм на поверхности РГ<sub>ф</sub> характеризуется скоплениями различного числа частиц в области неровностей поверхности графита, и лишь единичные частицы находятся на ровной поверхности (рис. 11). В отличие от образца БАУ-А наночастицы Ag концентрируются в основном на неровностях крупных гладких пластинок РГ<sub>ф</sub>. Ввиду отсутствия пор на поверхности РГ<sub>ф</sub>, размер которых соизмерим с размерами частиц Ag, адсорбция серебра проис-

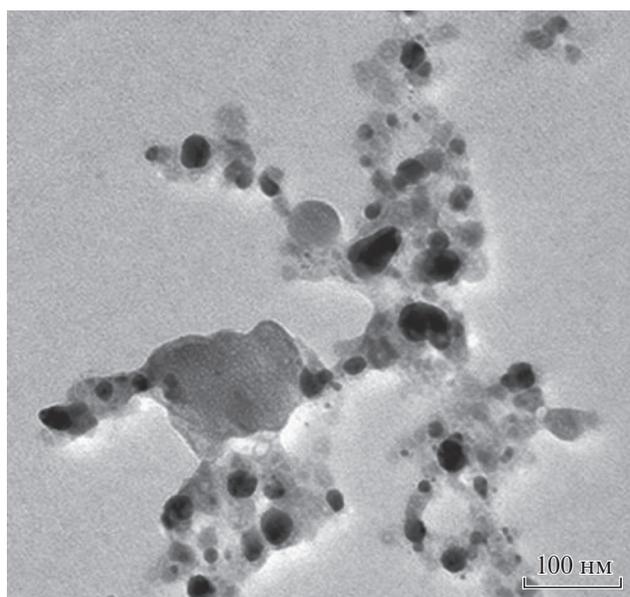


Рис. 11. Вид поверхности сорбента РГ<sub>ф</sub>, содержащего кластерные частицы серебра.

ходит в основном в зонах с относительно небольшим адсорбционным потенциалом на имеющихся неровностях подложки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из полученных результатов следует, что бактериостатическая активность препаратов кластерного серебра в отношении тест-культур грамотрицательных бактерий *Azotobacter vinelandii* и грамположительных бактерий *Bacillus licheniformis* при прочих равных условиях определяется параметрами пористой структуры углеродной подложки. При на-

личии высокого адсорбционного потенциала на углеродной подложке межфазовый перенос частиц серебра в объем питательной среды бактериальной микрофлоры затруднен. Именно наличие развитой микропористой структуры с высоким адсорбционным потенциалом и наличие пор с диаметрами, соизмеримыми с размерами частиц кластерного серебра, стали определяющими факторами слабого массопереноса частиц Ag в бактериальную фазу и связанной с этим низкой биоактивности препарата [БАУ-А]Ag<sub>nano</sub>. Поверхность PГ<sub>ф</sub> характеризуется низким адсорбционным потенциалом и отсутствием пор, соизмеримых с размерами частиц Ag. Отсутствие соизмеримых пор, способных удерживать частицы серебра на поверхности сорбента в соответствии с закономерности массообмена в системе адсорбент–адсорбат–смежная бактериальная фаза, ведет к увеличению массообмена и биоактивности препарата PГ<sub>ф</sub>Ag<sub>nano</sub>. Поэтому препарат на основе PГ<sub>ф</sub> проявил более высокую биоактивность в отношении грамположительной (*Bacillus licheniformis*) и грамотрицательной (*Azotobacter vinelandi*) культур бактерий, чем [БАУ-А]Ag<sub>nano</sub>.

Таким образом, установлена прямая взаимосвязь между текстурными характеристиками углеродных подложек и бактериостатической активностью биоцидных препаратов на их основе. Полученные результаты свидетельствуют о том, что препараты кластерного серебра на подложке из фторсодержащего расширенного графита PГ<sub>ф</sub>, характеризующегося отсутствием пор, соизмеримых с размерами частиц Ag, и слабовыраженным адсорбционным потенциалом, являются пер-

спективными биоцидными добавками к резинотехническим и полимерным материалам.

Авторы выражают благодарность Центру коллективного пользования в г. Черноголовка за предоставленную возможность изучения структуры объектов на электронном микроскопе JEM-2100.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований ИХФ РАН № 46.15 по государственному заданию № 0082-2014-0005 (номер государственной регистрации ЦИТИС: АААА-А17-117091220076-4).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цой Ю.А., Фильков М.Н., Кононенко А.Б. // Вестн. ВНИИМЖ. 2016. № 1(21). С. 82.
2. Дубинин М.М. Пористая структура и адсорбционные свойства активных углей. М.: Изд-во ВАХЗ, 1965.
3. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. Пер. с англ. 2-е изд. М.: Мир, 1984.
4. Хохлов С.С., Дьячкова Л.Г., Куткин А.В. и др. // Хим. безопасность. 2018. Т. 2. № 1. С. 81; <https://doi.org/10.25514/CHS.2018.1.12884>
5. Хохлов С.С., Дьячкова Л.Г., Куткин А.В. и др. // Матер. IV Междунар. конф. “Актуальные научные и научно-технические проблемы обеспечения химической безопасности” (ASTICS-2018). М.: ИХФ РАН, 2018. С. 184; <https://doi.org/10.25514/CHS.2018.10.5577>
6. <http://ru/research/asap-2020>
7. Дубинин М.М. // Успехи химии. 1982. Вып. 7. Т. LI. С. 1065.
8. Horwarth G., Kavazoe, K.J. // Eng. Jap. 1983. V. 16. P. 470.
9. Horwarth G. // Colloids Surf., A. 1998. V. 141. P. 295.