

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СИНТЕЗИРОВАННЫХ НА ГРАФИТЕ НАНОЧАСТИЦ ПЛАТИНЫ С ЗАКИСЬЮ АЗОТА

© 2023 г. Д. Баймухамбетова<sup>1, 2</sup>, А. К. Гатин<sup>1</sup>, С. А. Озерин<sup>1</sup>, М. В. Гришин<sup>1</sup>, \*

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики  
им. Н.Н. Семенова РАН, ул. Косыгина 4, Москва, 119334 Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
Институтский пер. 9, Долгопрудный, Московская область, 141701 Россия

\*e-mail: mvgrishin68@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.04.2023 г.

После доработки 15.05.2023 г.

Принята к публикации 18.05.2023 г.

Гетерогенные каталитические реакции с участием закиси азота ( $N_2O$ ) представляют большой интерес для медицины, техники, экологии. Цель работы состояла в установлении особенностей адсорбции и последующего взаимодействия молекул  $N_2O$  с каталитической системой на основе металлических наночастиц при комнатной температуре. Методами сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии, а также Оже-спектроскопии определены результаты и продукты адсорбции закиси азота на поверхности единичных наночастиц Pt, синтезированных на высокоориентированном пиролитическом графите. Показано, что при малых экспозициях образовавшиеся в результате диссоциативной адсорбции атомы кислорода окисляли поверхность наночастиц только вблизи интерфейса платины и графита. По мере увеличения экспозиции оксидом покрывалась уже вся поверхность наночастиц. Таким образом, в работе показано, что адсорбционные свойства поверхности наночастиц платины на графите неодинаковы, что может позволить осуществлять различные химические реакции на различных участках, тем самым повышая эффективность каталитической системы в целом.

DOI: 10.31857/S0023291223600219, EDN: UDNXPG

### ВВЕДЕНИЕ

Реакции с участием закиси азота ( $N_2O$ ) представляют практический интерес, поскольку это вещество используется, например, в медицине [1] в качестве пропеллента [2], упаковочного газа [3], а также в ракетных двигателях как окислитель или монокомпонентное топливо [4]. Велика роль закиси азота в экологии, поскольку этот газ разрушает озоновый слой в атмосфере [5]. Следовательно, возникает практически важная задача регулирования концентрации закиси азота в окружающей среде. Один из способов ее решения состоит в использовании катализаторов, позволяющих превращать закись азота в безвредные химические соединения. Для этого предлагались различные каталитические системы на основе благородных (Au, Rh, Ru, Pd, Pt) и переходных (Fe, Cu, Co, Ni) металлов и их оксидов, нанесенных на различные подложки [6–13]. В цитированных выше работах превращение закиси азота, как правило, происходило при достаточно высоких температурах  $T \geq 500$  К, что вызывает определенные технические трудности. Однако в [14] продемонстрировано, что на поверхности слоя Pt на окисленном кремнии наблюдалась диссоциатив-

ная адсорбция  $N_2O$  (с образованием адатомов кислорода) даже при  $T = 363$  К. Таким образом, именно наночастицы платины можно рассматривать как перспективный катализатор для химических реакций с участием  $N_2O$  при сравнительно низких температурах.

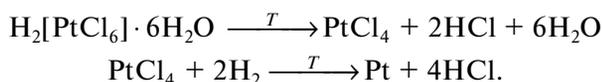
Во всех описанных выше процессах ключевой стадией взаимодействия газообразных молекул являлась адсорбция на катализаторе. По вопросу об адсорбции и взаимодействии платины с  $N_2O$  имеются довольно противоречивые сведения. В ряде работ отмечается, что закись азота адсорбируется на Pt только при низких температурах [15] либо не адсорбируется совсем [16]. В [17] сообщается о восстановлении закиси азота молекулярным водородом на наночастицах Pt размером порядка 1 нм при  $T \approx 380$  К. Продемонстрирована кардинальная зависимость этого процесса от размера наночастиц. Цель настоящей работы состояла в установлении возможности и условий окисления наночастиц платины, нанесенных на поверхность графита, закисью азота –  $N_2O$  при  $T = 300$  К.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве подложки, на которую наносили наночастицы, использовался высокоориентированный пиролитический графит (ВОПГ) (НТ-МДТ, Россия). Поверхность ВОПГ инертна и характеризуется обширными атомно-гладкими террасами С(0001), мозаичность –  $0.8 \pm 0.2^\circ$ . Для синтеза наночастиц Pt использовался прекурсор – водный раствор гексахлорплатиновой кислоты  $\text{H}_2[\text{PtCl}_6]$  с концентрацией металла  $(2\text{--}2.5) \times 10^{-5}$  г/мл (Sigma-Aldrich, США). Также применялись газообразные реагенты: молекулярный водород  $\text{H}_2$  и закись азота  $\text{N}_2\text{O}$ . Оба газа соответствовали по чистоте марке В.Ч. (концентрация целевого газа – 99.999%) (ООО “БК Групп”, Россия).

Исследования проводились на сверхвысоковакуумной установке, созданной на базе УСУ-4 (Россия). Давление остаточных газов в установке не превышало  $2 \times 10^{-10}$  торр. В камере установки размещены сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) с варьируемой температурой образца Omicron VT STM (Германия), Оже-электронный спектрометр (ОЭС) Omicron CMA-100 (Германия), масс-спектрометр (МС) Hiden Analytical HAL-301 PIC (Великобритания), система запуска газов с натекателем Granvill-Phillips series 203 (США) и различные манипуляторы.

Нанесение наночастиц Pt на поверхность ВОПГ осуществляли методом пропитки. Для этого прекурсор наносили на графит, сушили, помещали в сверхвысоковакуумную установку и в течение 28–30 ч отжигали при  $T = 750$  К, в том числе несколько часов при напуске молекулярного водорода. Разложение прекурсора при нагревании протекает по следующей схеме:



Мониторинг элементного состава поверхности образца осуществляли методами Оже-спектроскопии. Структура покрытия, форма, размеры и электронное строение единичных наночастиц определяли по данным СТМ. Для выявления локального электронного строения поверхности наночастиц Pt перед экспозицией в  $\text{N}_2\text{O}$  и после нее использовали метод сканирующей туннельной спектроскопии. Известно, что вольт-амперная характеристика (ВАХ) туннельного контакта СТМ определяется электронным строением зонда и образца [18]. Это означает, что с помощью туннельной сканирующей микроскопии можно наблюдать трансформацию электронного строения поверхности наночастиц Pt вследствие адсорбции и протекания химических реакций. Достоверность результатов, полученных в ходе спектроскопических измерений в СТМ на поверхности наночастиц, обеспечивается постоянным мониторингом состояния

зонда СТМ при сканировании бездефектного участка поверхности ВОПГ. Таким образом, в работе анализировали вольт-амперные зависимости туннельных контактов СТМ, содержащих наночастицы Pt (далее – ВАХ Pt), и туннельных контактов СТМ, образованных металлическим острием и бездефектным участком ВОПГ (далее – ВАХ графита).

В измерениях с помощью СТМ применяли острия, изготовленные из поликристаллической вольфрамовой проволоки путем электрохимического травления в водном растворе КОН и дополнительно обработанные пучком ионов аргона. В исследовании использовались только те острия, которые при измерении ВАХ графита демонстрировали S-образную зависимость тока от напряжения, характерную для туннельного контакта двух металлов.

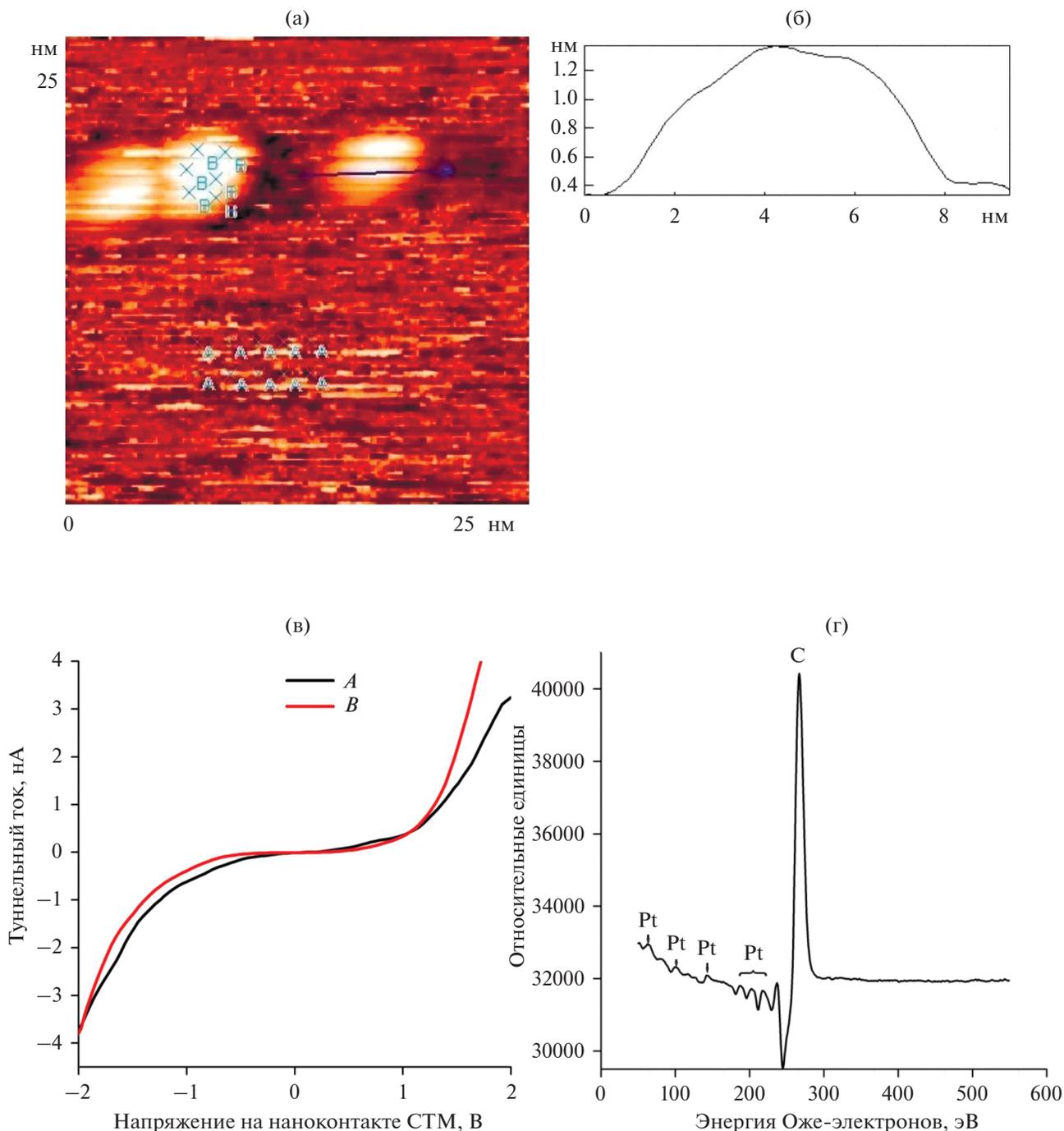
Экспозиция образца в  $\text{N}_2\text{O}$  осуществлялась при давлении  $1 \times 10^{-7}$  торр. Контроль состава газовой среды в камере на всех этапах эксперимента осуществлялся по данным МС. Величина экспозиции образца определялась в Ленгмюрах,  $1 \text{ Л} = 1 \times 10^{-6}$  торр с.

Для экспериментов были приготовлены три однотипных образца, содержавших платиновое наноструктурированное покрытие на ВОПГ. Топографические и спектроскопические измерения в СТМ проводились на нескольких удаленных друг от друга участках поверхности каждого образца, которые включали десятки наночастиц. Количество измеренных ВАХ на одном участке поверхности образца составляло порядка 2500 кривых, причем для каждой наночастицы были получены десятки зависимостей туннельного тока от напряжения, которые стали предметом дальнейшего анализа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Измерения в СТМ показали, что после завершения синтеза на поверхности ВОПГ образовались многочисленные наночастицы, большинство из которых входило в состав группирующихся преимущественно вблизи границ террас скоплений (рис. 1а). Наночастицы имели форму сплюснутой полусферы с характерным латеральным диаметром 4–8 нм и высотой 1–2 нм (рис. 1б). Они покрывали не более 15% поверхности подложки.

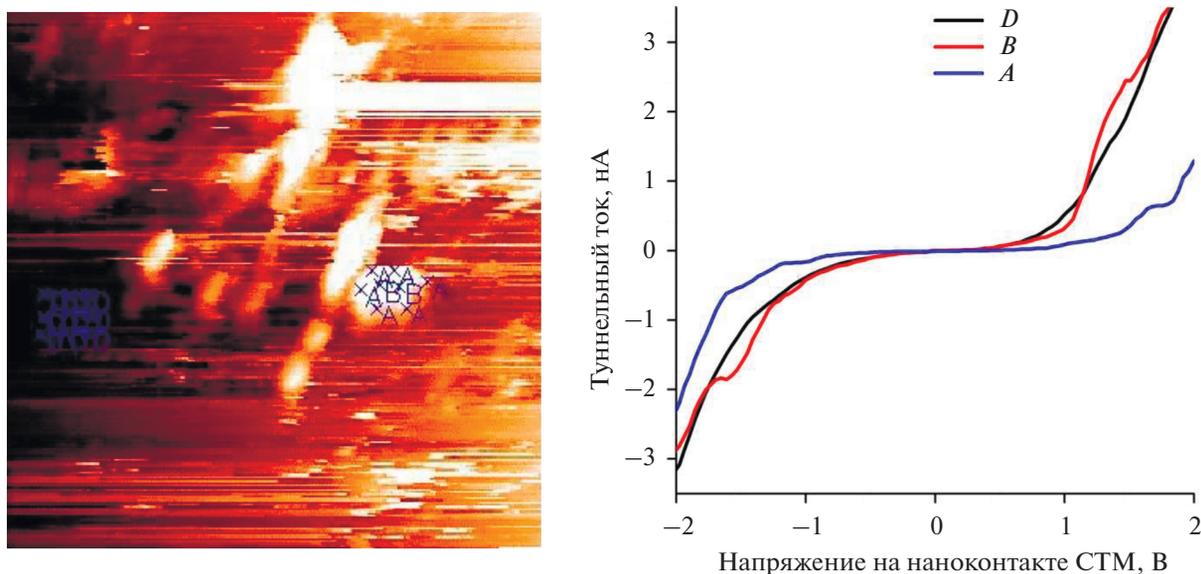
Результаты спектроскопических исследований образца в СТМ показали, что полученные в разных точках поверхности наночастиц платины ВАХ практически полностью идентичны и близки к ВАХ графита. Усредненные по площади ВАХ графита и наночастиц (кривые А и В на рис. 1в) имели S-образную форму линии, характерную для образованного металлами туннельного контакта. Эти данные позволили заключить, что электронное строение поверхности наночастиц однородно и соответствует электронному строению металла, т.е. платина



**Рис. 1.** Наночастицы платины на поверхности ВОПГ: а – топографическое изображение с указанием точек измерения ВАХ (*A*, *B*), б – профиль вдоль указанной линии; в – усредненные вольт-амперные зависимости (*A* – ВОПГ, *B* – Pt); г – Оже-спектр образца с указанием линий углерода (*C*) и платины (Pt).

свободна от оксида. Необходимо также отметить, что результаты измерений образца в ОЭС подтвердили этот вывод. Действительно, на Оже-спектре образца отчетливо наблюдаются линия углерода (272 эВ) и линии платины (в диапазоне 64–217 эВ), но отсутствуют линии хлора (181 эВ) и кислорода (510 эВ), см. рис. 1г.

Выдержка образца в N<sub>2</sub>O (экспозиция – 40 Л, *T* = 300 К) привела к существенному изменению электронного строения наночастиц, см. рис. 2. На ВАХ Pt, усредненных по периферийной области наночастиц, т.е. вблизи интерфейса платины с ВОПГ и измеренных после удаления закиси азота из сверхвысоковакуумной камеры, появился уча-



**Рис. 2.** Наночастицы Pt на поверхности ВОПГ после экспозиции 40 Л в  $N_2O$ : слева – топографическое изображение с указанием точек измерения ВАХ (*A*, *B*, *D*), справа – соответствующие усредненные вольт-амперные зависимости (*A* – периферийная область наночастицы Pt, *B* – вершина наночастицы Pt, *D* – ВОПГ).

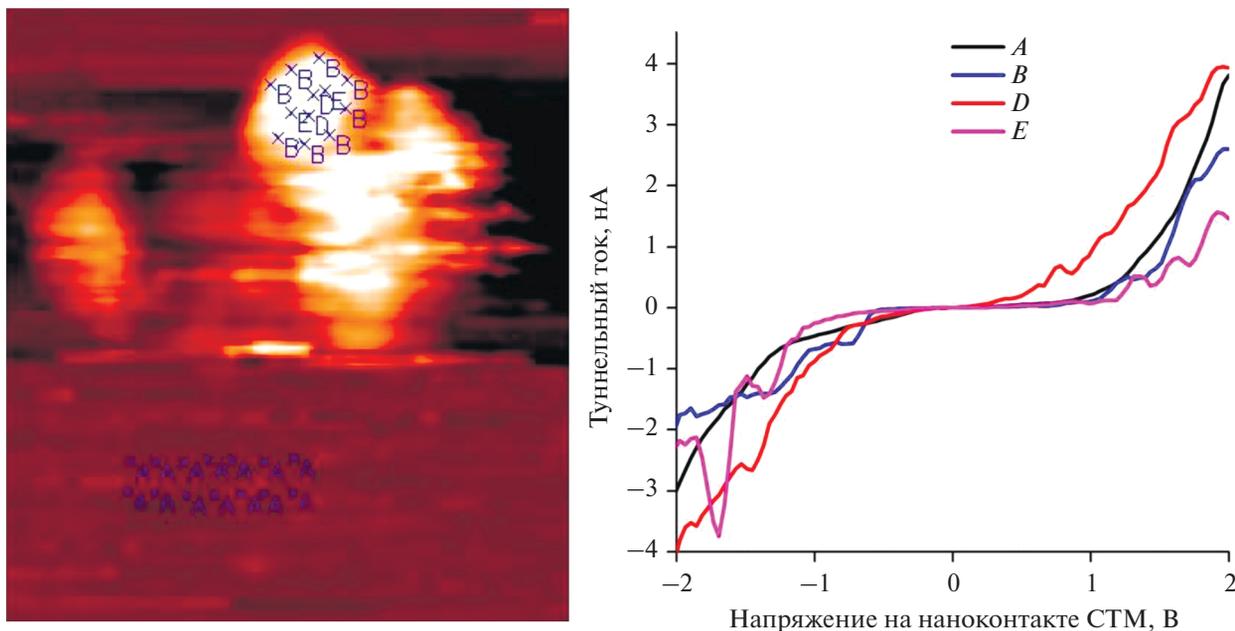
сток нулевого тока шириной около 1 В (кривая *A* на рис. 2). В то же время форма усредненных кривых ВАХ графита осталась прежней, т.е. после экспозиции в  $N_2O$  металлическое электронное строение острия СТМ сохранилось (кривая *D* на рис. 2). Следовательно, на периферийной области наночастиц Pt образовался полупроводник с шириной запрещенной зоны 1 эВ. Известно, что оксид платины  $PtO_2$  имеет запрещенную зону шириной 1.2–2.5 эВ [19–21]. В то же время, согласно [22, 23], расчетное значение ширины запрещенной зоны для оксида платины PtO составляет 0.86–0.87 эВ и снижается до 0.56 эВ при уменьшении содержания кислорода в системе на 10%. Для оксидов платины  $PtO_x$ ,  $1 < x < 2$ , также наблюдается уменьшение ширины запрещенной зоны [21]. Таким образом, наиболее вероятно, что мы наблюдали образование на периферии наночастицы слоя оксида  $PtO_2$  с дефицитом атомов кислорода.

Необходимо обратить внимание на то обстоятельство, что наиболее удаленная от интерфейса с графитом область – вершина – сохранила свое электронное строение: ВАХ, усредненные по этой области наночастицы, демонстрировали S-образную форму (кривая *B* на рис. 2). Таким образом, адсорбционные свойства наночастиц Pt по отношению к  $N_2O$  оказались существенно различны для периферийной области и вершины. Подобное явление наблюдалось нами ранее при адсорбции  $H_2$  на золотых наночастицах [24], окислении наночастиц Ni молекулярным кислородом [25] и восстановлении окисленных наночастиц Pt с помощью  $H_2$  и CO [26]. По-видимому, эти резуль-

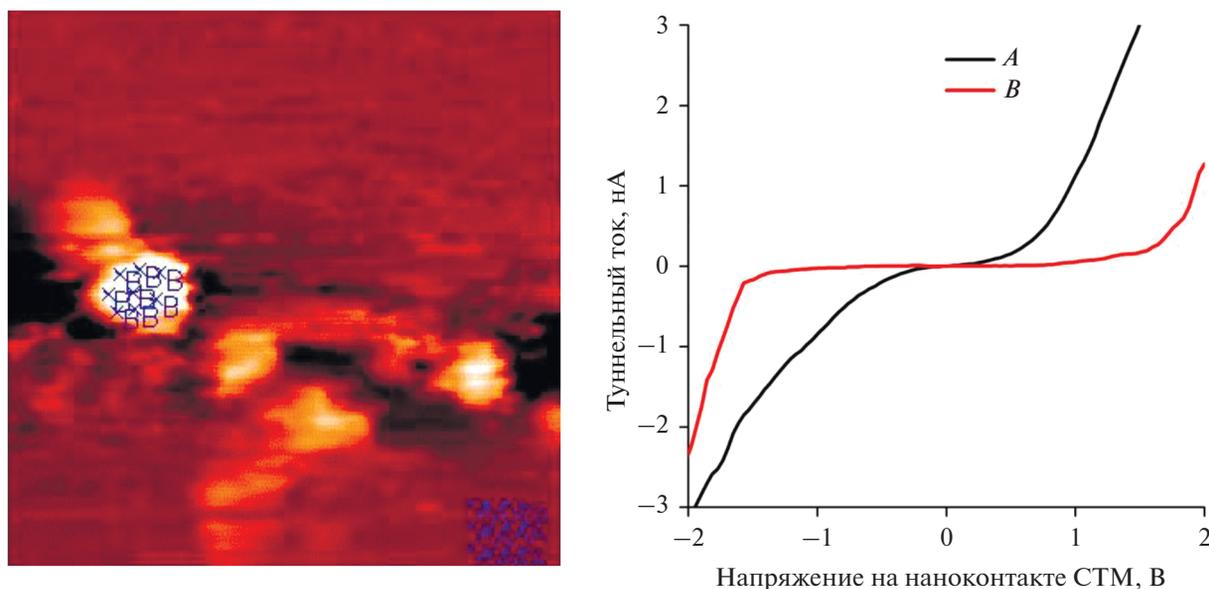
таты связаны с фундаментальными особенностями атомной структуры и электронного строения наночастиц, вызванного достаточно сильным взаимодействием с ВОПГ.

Дальнейшая выдержка образца в  $N_2O$  (суммарная экспозиция – 80 Л,  $T = 300$  К) привела к количественному и качественному изменению электронного строения поверхности наночастиц платины при том, что электронное строение зонда СТМ не изменилось. Спектроскопическое исследование образца в СТМ было проведено после удаления закиси азота из сверхвысоковакуумной камеры. Усредненные ВАХ графита сохранили свой первоначальный вид. Ширина участка нулевого тока на ВАХ Pt, усредненных по периферийной области наночастиц, увеличилась до 1.3 В (кривая *B* рис. 3). В то же время ВАХ Pt, измеренные на вершинах наночастиц, потеряли однородность. На некоторых кривых также возник участок нулевого тока шириной 1.3 В, (кривая *E* на рис. 3), хотя их большая часть сохранила свое исходное металлическое состояние (кривая *D* рис. 3). Таким образом, установлено, что по-прежнему адсорбция атомов кислорода происходила в основном вблизи интерфейса Pt-ВОПГ, но небольшое количество адатомов кислорода появилось на вершине наночастицы.

Повышение суммарной экспозиции в  $N_2O$  до 200 Л привело к полному окислению поверхности наночастиц Pt, см. рис. 4. На усредненной ВАХ Pt наблюдался участок нулевого тока шириной около 2 В, что соответствовало полупроводнику с запрещенной зоной 2 эВ. Это значение близко к зна-



**Рис. 3.** Наночастицы Pt на поверхности ВОПГ после экспозиции в N<sub>2</sub>O 80 Л: слева – топографическое изображение с указанием точек измерения ВАХ (*A, B, D, E*), справа – вольт-амперные зависимости (*A* – ВОПГ, *B* – периферийная область наночастицы Pt, *D* и *E* – вершина наночастицы Pt).



**Рис. 4.** Наночастицы Pt на поверхности ВОПГ после суммарной экспозиции 200 Л в N<sub>2</sub>O: слева – топографическое изображение с указанием точек измерения ВАХ, справа – усредненные вольт-амперные зависимости (*A* – ВОПГ, *B* – наночастица Pt).

чению ширины запрещенной зоны оксида платины PtO<sub>2</sub>. По-прежнему усредненная ВАХ графита не претерпела заметных изменений. Таким образом, в результате экспозиции 200 Л в закиси азота образца, содержавшего наночастицы Pt, на поверхности

последних произошло образование практически стехиометрического оксида платины (IV).

Ранее мы исследовали восстановление различными газами окисленных наночастиц Pt [26]. При этом на предварительной стадии исследова-

ния окисление не содержащей примесей поверхности нанесенных наночастиц Pt проводилось молекулярным кислородом при  $T = 750$  К и экспозиции 2000 Л. Экспозиция наночастиц платины в  $O_2$  при комнатной температуре не приводила к образованию оксида на их поверхности.

То есть, яркими различиями окисления поверхности наночастиц Pt с помощью  $O_2$  и  $N_2O$  являются, во-первых, более низкая температура, при которой происходит окисление при взаимодействии с  $N_2O$  по сравнению с  $O_2$  (273 и 750 К), и, во-вторых, величина экспозиции, необходимой для полного окисления этой поверхности (200 и 2000 Л).

Такие отличия свидетельствуют о большей активности  $N_2O$  в указанных процессах. Действительно, высвобождение атома кислорода О из молекулы  $N_2O$  является энергетически более выгодным процессом, чем из молекулы  $O_2$  [27]: величина энергии связи О—О в молекуле  $O_2$  составляет 498 кДж/моль, в то время как в молекуле  $N_2O$  величина энергии связи N—О — 167 кДж/моль [28].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методами сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии установлено, что при комнатной температуре взаимодействие нанесенных на поверхность ВОПГ наночастиц платины с  $N_2O$  приводит к образованию на их поверхности оксида  $PtO_2$ . Продемонстрировано, что на начальных стадиях окисления периферия и вершина наночастиц Pt проявляют различные адсорбционные и реакционные свойства по отношению к закиси азота. После экспозиции 40 Л в  $N_2O$  наличие оксида фиксируется только в периферийной области наночастиц, а вершина наночастицы остается свободной от оксида. После суммарной экспозиции образца в  $N_2O$  80 Л начинается образование отдельных оксидных кластеров и на вершине наночастицы. При экспозициях 200 Л на всей поверхности наночастиц происходило образование оксида близкого по электронному строению к  $PtO_2$ .

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 21-73-20010).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Knuf K., Maani C.V. Nitrous Oxide. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK532922>.
2. Murray M.J., Murray W.J. Nitrous oxide availability // The Journal of Clinical Pharmacology. 1980. V. 20. № 4. P. 202–205. <https://doi.org/10.1002/j.1552-4604.1980.tb01697.x>
3. Wang Z.-C., Yan Y., Fang Z., Nisar T., Sun L., Guo Y., Xia N., Wang H., Chen D.-W. Application of nitric oxide in modified atmosphere packaging of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets // Food Control. 2019. V. 98. P. 209–215. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.11.043>
4. Zakirov V., Sweeting M., Lawrence T., Sellers J. Nitrous oxide as a rocket propellant // Acta Astronautica. 2001. V. 48. № 5–12. P. 353–362. [https://doi.org/10.1016/S0094-5765\(01\)00047-9](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(01)00047-9)
5. Müller R. The impact of the rise in atmospheric nitrous oxide on stratospheric ozone // Ambio. 2021. V. 50. № 1. P. 35–39. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01428-3>
6. Kapteijn F., Rodriguez-Mirasol J., Moulijn J.A. Heterogeneous catalytic decomposition of nitrous oxide // Applied Catalysis B: Environmental. 1996. V. 9. № 1–4. P. 25–64. [https://doi.org/10.1016/0926-3373\(96\)90072-7](https://doi.org/10.1016/0926-3373(96)90072-7)
7. Centi G., Perathoner S., Vazzana F., Marella M., Tomaselli M., Mantegazza M. Novel catalysts and catalytic technologies for  $N_2O$  removal from industrial emissions containing  $O_2$ ,  $H_2O$  and  $SO_2$  // Advances in Environmental Research. 2000. V. 4. № 4. P. 325–338. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(00\)00032-0](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(00)00032-0)
8. Santiago M., Hevia M.A.G., Pérez-Ramírez J. Evaluation of catalysts for  $N_2O$  abatement in fluidized-bed combustion // Applied Catalysis B: Environmental. 2009. V. 90. № 1–2. P. 83–88. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2009.02.017>
9. Li Yu., Armor J.N. Catalytic decomposition of nitrous oxide on metal exchanged zeolites // Applied Catalysis B: Environmental. 1992. V. 1. № 3. P. L21–L29. [https://doi.org/10.1016/0926-3373\(92\)80019-V](https://doi.org/10.1016/0926-3373(92)80019-V)
10. Centi G., Galli A., Montanari B., Perathoner S., Vaccaria A. Catalytic decomposition of  $N_2O$  over noble and transition metal containing oxides and zeolites. Role of some variables on reactivity // Catalysis Today. 1997. V. 35. № 1–2. P. 113–120. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(96\)00137-X](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(96)00137-X)
11. Liu Z., Amiridis M.D., Chen Y. Characterization of CuO supported on tetragonal  $ZrO_2$  catalysts for  $N_2O$  decomposition to  $N_2$  // The Journal of Physical Chemistry B. 2005. V. 109. № 3. P. 1251–1255. <https://doi.org/10.1021/jp046368q>
12. Xu X., Xu H., Kapteijn F., Moulijn J.A. SBA-15 based catalysts in catalytic  $N_2O$  decomposition in a model tail-gas from nitric acid plants // Applied Catalysis B: Environmental. 2004. V. 53. № 4. P. 265–274. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2004.04.023>
13. Smeets P.J., Sels B.F., van Teeffelen R.M., Leeman H., Hensen E.J.M., Schoonheydt R.A. The catalytic performance of Cu-containing zeolites in  $N_2O$  decomposition and the influence of  $O_2$ , NO and  $H_2O$  on recombination of oxygen // Journal of Catalysis. 2008. V. 256. № 2. P. 183–191. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2008.03.008>
14. Kim M.H., Ebner J.R., Friedman R.M., Vannice M.A. Dissociative  $N_2O$  adsorption on supported Pt // Jour-

- nal of Catalysis. 2001. V. 204. P. 348–357.  
<https://doi.org/10.1006/jcat.2001.341>
15. *Habraken F.H.P.M., Kieffer E.P., Bootsma G.A.* A study of the kinetics of the interactions of O<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O with a Cu(111) surface and of the reaction of CO with adsorbed oxygen using aes, LEED and ellipsometry // *Surface Science*. 1979. V. 83. № 1. P. 45–59.  
[https://doi.org/10.1016/0039-6028\(79\)90479-5](https://doi.org/10.1016/0039-6028(79)90479-5)
  16. *Avery N.R.* An EELS study of N<sub>2</sub>O adsorption on Pt(111) // *Surface Science*. 1983. V. 131. № 2–3. P. 501–510.  
[https://doi.org/10.1016/0039-6028\(83\)90294-7](https://doi.org/10.1016/0039-6028(83)90294-7)
  17. *Kim M.H., Kim D.H.* Low-temperature reduction of N<sub>2</sub>O by H<sub>2</sub> over Pt/SiO<sub>2</sub> catalysts // *Journal of Environmental Science International*. 2013. V. 22. № 1. P. 73–81.  
<https://doi.org/10.5322/JES.2013.22.1.73>
  18. *Guntherodt H.-J., Wiesendanger R.* Scanning Tunneling Microscopy I: General Principles and Applications to Clean and Adsorbate-covered Surfaces. Berlin: Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1992.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-97343-7>
  19. *Jin Z., Xi C., Zeng Q., Yin F., Zhao J., Xue J.* Catalytic behavior of nanoparticle  $\alpha$ -PtO<sub>2</sub> for ethanol oxidation // *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 2003. V. 191. № 1. P. 61–66.  
[https://doi.org/10.1016/S1381-1169\(02\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S1381-1169(02)00029-8)
  20. *Canart-Martin M.C., Delrue J.P., Laude L.D., Wautelet M.* Electronic structure and reduction processes in PtO<sub>x</sub> films // *Chemical Physics*. 1980. V. 48. № 2. P. 283–288.  
[https://doi.org/10.1016/0301-0104\(80\)80058-9](https://doi.org/10.1016/0301-0104(80)80058-9)
  21. *Neff H., Henkel S., Hartmannsgruber E., Steinbeiss E., Michalke W., Steenbeck K., Schmidt H.* Structural, optical, and electronic properties of magnetron-sputtered platinum oxide films // *Journal of Applied Physics*. 1996. V. 79. № 10. P. 7672–7675.  
<https://doi.org/10.1063/1.362341>
  22. *Uddin J., Peralta J.E., Scuseria G.E.* Density functional theory study of bulk platinum monoxide // *Physical Review B*. 2005. V. 71. № 15. P. 155112.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.155112>
  23. *Kaewmaraya T., Ramzan M., Sun W., Sagynbaeva M., Ahuja R.* Atomistic study of promising catalyst and electrode material for memory capacitors: Platinum oxides // *Computational Materials Science*. 2013. V. 79. P. 804–810.  
<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.07.021>
  24. *Gatin A.K., Grishin M.V., Dokhlikova N.V., Sarvadii S.Yu., Shub B.R.* Hydrogenation of HOPG-supported gold nanoparticles: Features of initial stages // *Crystals*. 2019. V. 9. № 7. P. 350.  
<https://doi.org/10.3390/cryst9070350>
  25. *Gatin A.K., Sarvadii, S.Y., Dokhlikova N.V., Kharitonov V.A., Ozerin S.A., Shub B.R., Grishin M.V.* Oxidation of supported nickel nanoparticles at low exposure to O<sub>2</sub>: Charging effects and selective surface activity // *Nanomaterials*. 2022. V. 12. № 7. P. 1038.  
<https://doi.org/10.3390/nano12071038>
  26. *Гатин А.К., Дохликова Н.В., Мухутдинова Р.Г., Озерин С.А., Гришин М.В.* Особенности взаимодействия окисленных наночастиц платины с молекулярным водородом и монооксидом углерода // *Коллоид. журн.* 2022. Т. 84. № 6. С. 705–714.  
<https://doi.org/10.31857/S0023291222600110>
  27. *Дубков К.А., Панов Г.И., Пармон В.Н.* Оксид азота(I) как селективный окислитель в реакциях кетонизации двойных связей С=С органических соединений // *Успехи химии*. 2017. Т. 86. № 6. С. 510–529.  
<https://doi.org/10.1070/RCR4697?locatt=label:RUS-SIAN>
  28. *Haynes W.M.* CRC Handbook of Chemistry and Physics, 97th ed. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2016.