

P15-2014-6

А. Ю. Дидык \*, Р. Вишневецкий <sup>1, \*\*</sup>

СИНТЕЗ НОВЫХ СТРУКТУР  
НА ПОВЕРХНОСТИ Pd-СТЕРЖНЯ  
И ЭЛЕМЕНТОВ **ННРС** И ИХ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ  
ПРИ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ  
ТОРМОЗНЫХ  $\gamma$ -КВАНТОВ С ПОРОГОВОЙ ЭНЕРГИЕЙ  
10 МэВ В МОЛЕКУЛЯРНОМ ВОДОРОДЕ  
ПРИ ДАВЛЕНИИ 0,5 КБАР

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

---

<sup>1</sup> Национальный центр ядерных исследований, Отвоцк, Польша

\* E-mail: didyk@jinr.ru

\*\* E-mail: roland.wiśniewski@gmail.com

Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.

P15-2014-6

Синтез новых структур на поверхности Pd-стержня и элементов ННРС и их химический состав при ядерных реакциях под действием тормозных  $\gamma$ -квантов с пороговой энергией 10 МэВ в молекулярном водороде при давлении 0,5 кбар

Камера высокого давления водорода (ННРС) с Pd-стержнем внутри была заполнена молекулярным водородом при давлении 0,5 кбар. ННРС была облучена тормозными  $\gamma$ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ при интенсивности пучка электронов 20–21 мкА в течение 14 ч. Послерадационные исследования структуры и элементного состава Pd-стержня и неоднородностей всех внутренних поверхностей элементов ННРС, а также крупной синтезированной структуры, обнаруженной после облучения, позволили установить наличие в них легких элементов от углерода до кальция. Помимо этого найдены и изучены множественные малого размера частицы свинца. Обнаруженная синтезированная частица имеет сложную форму и состав. На внутренних поверхностях ННРС найдены тонкостенные микротрубки. Сделана попытка объяснить обнаруженные аномалии на основе реакций деления ядер средних масс (нисходящие реакции) и реакций синтеза элементов из водорода и более тяжелых ядер (восходящие реакции).

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.  
Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2014

Didyk A. Yu., Wiśniewski R.

P15-2014-6

Synthesis of New Structures on the Surface of a Pd-Rod and ННРС Elements and Their Chemical Composition under Nuclear Reactions Induced by Braking  $\gamma$ -Rays with a Threshold Energy of 10 MeV in Molecular Hydrogen at 0.5 kbar Pressure

A high-pressure chamber filled with molecular hydrogen (ННРС) at 0.5 kbar pressure, with a Pd-rod inside, was exposed during 14 hours to braking  $\gamma$ -rays with a threshold energy of 10 MeV produced by an electron beam of 20–21  $\mu$ A intensity. The studies of the changes in the structure and element composition of the Pd-rod and irregularities of all the internal surfaces of the ННРС elements, as well as large synthetic structures detected after irradiation, established the presence in them of light elements from carbon to calcium. Besides that, multiple small-sized particles of lead were also found and studied. The detected synthesized particle has a complex shape and composition. Also, thin-walled micro tubes were registered on the inner surfaces inside the ННРС. An attempt is made to explain the observed anomalies based on fission reactions of intermediate mass (downstream reactions) and reactions of fusion of elements from hydrogen and heavier nuclei (upstream reactions).

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2014

## ВВЕДЕНИЕ

Результаты исследований образцов металлов Al, V, Cu, Pd, Re и сплавов  $\gamma\text{Mn}_2$  и нержавеющей стали при давлении дейтерия 1,2; 2,0 и 3,0 кбар при облучении  $\gamma$ -квантами с энергиями 9, 10, 11 и 23 МэВ представлены в работах [1–13]. В этих исследованиях в результате прошедших ядерных реакций (см. феноменологический модельный подход, развитый в [14–16]) были обнаружены значительные изменения элементного состава и структуры поверхностей всех компонентов внутри камеры ДНРС (deuterium high pressure chamber). Были получены также и новые синтезированные структуры.

Детальные исследования элементных составов всех исходных материалов, входящих в элементы внутренних конструкций ДНРС и объектов исследования, до и после воздействия  $\gamma$ -квантов позволили однозначно установить как образование в процессе протекающих ядерных реакций более легких продуктов, т. е. легче, чем изучаемый материал мишени в ДНРС, от углерода до цинка, так и возникновение в значительных количествах более тяжелых по сравнению с материалом изучаемой мишени элементов, таких как  $^{40}\text{Zr}$ ,  $^{41}\text{Nb}$ ,  $^{44}\text{Ru}$ ,  $^{45}\text{Rh}$ ,  $^{47}\text{Ag}$ ,  $^{73}\text{Ta}$ ,  $^{74}\text{W}$ ,  $^{78}\text{Pt}$ ,  $^{79}\text{Au}$  и  $^{82}\text{Pb}$  (см., например, [7, 8, 17]).

На основе установленных образовавшихся в результате ядерных реакций химических элементов в столь широком диапазоне зарядов ядер эмпирических закономерностей была предложена феноменологическая модель, учитывающая, как нам казалось, большинство возможных, т. е. не запрещенных ядерных реакций, даже тех, которые имеют малые вероятности (см. [7, 8, 14–16]).

В работе [17] изучены изменения структуры и элементного состава Pd-стержня и сборника продуктов реакций, облученных в ННРС (hydrogen high pressure chamber) тормозными  $\gamma$ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ в молекулярном водороде при давлении 2,5 кбар. Были обнаружены аномалии в элементных составах и структурах поверхностей, схожие с экспериментами, выполненными с наполненными дейтерием ДНРС. Проведено описание ядерных реакций с водородом, а также реакций при рассеянии  $\gamma$ -квантов на атомах элементов камеры ННРС, вторичные продукты которых могут принимать участие в обнаруженных аномалиях.

В работах [18, 19] изучены аномалии в структуре поверхностей и элементного состава компонент камеры ННРС и двух синтезированных в процессе облучения тормозными  $\gamma$ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ структур при давлении молекулярного водорода 1 кбар, но без палладиевого стержня.

Цель настоящей работы — исследования возможностей протекания ядерных и других физико-химических реакций под действием тормозных  $\gamma$ -квантов при давлении молекулярного водорода 0,5 кбар при энергиях ниже энергии гигантского дипольного резонанса [20, 21]. Эти исследования будут осно-

вываться на изменениях элементного состава и структуры внутренних поверхностей компонентов, составляющих камеру ННРС, а именно: входного окна из бериллиевой бронзы, Pd-стержня, марганцевой фольги и сборника продуктов ядерных реакций, а также частиц микроскопических размеров на внутренних стенках латунной втулки, которые могут образовываться.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКА И ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 представлена камера высокого давления водорода с основными элементами. Как видно, в данном исследовании была использована камера со стандартным набором элементов, аналогичная примененным в экспериментах ДНРС [1–9] и ННРС [17] за исключением образца металла (палладия).

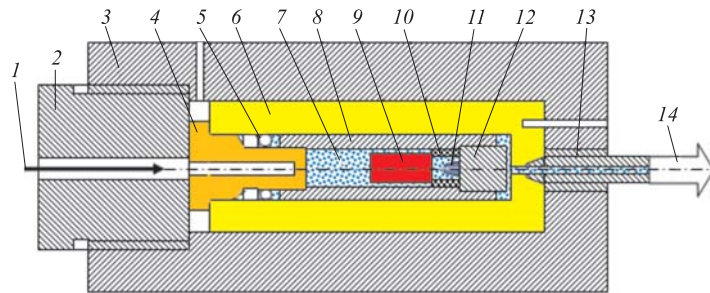


Рис. 1. Схематическое изображение ДНРС и ННРС: 1 — поток  $\gamma$ -квантов; 2 — уплотнение с входным отверстием; 3 — уплотнение для высокого давления в камере; 4 —  $\text{Cu}_{0,98}\text{Be}_{0,02}$  «входное окно»; 5 — уплотнение для высокого давления; 6 —  $\text{Cu}_{0,98}\text{Be}_{0,02}$ -стенки камеры высокого давления; 7 — дейтерий (ДНРС) или водород (ННРС); 8 — латунная втулка; 9 — Pd-стержень; 10 — разделительная фольга из марганца; 11 — синтезированный продукт реакции; 12 — латунный сборник; 13 — капилляр высокого давления; 14 — клапан и тензор-датчик давления

ННРС была заполнена молекулярным водородом при давлении на момент облучения 500 бар [1–4]. Такое давление соответствует атомной концентрации водорода  $n_{\text{H}} \approx 1,824 \cdot 10^{22}$  ат.  $\text{H} \cdot \text{см}^{-3}$  при его плотности:  $\rho_{\text{H}} \approx 0,0307$  г  $\cdot \text{см}^{-3}$  (см. [16] и ссылки на литературу). Облучение ННРС было проведено на ускорителе МТ-25 Лаборатории ядерных реакций. Энергия электронного пучка составляла 9,7 МэВ при среднем токе 20–21 мкА, и длительность облучения — 14 ч (т.е.  $5,04 \cdot 10^4$  с). Тормозные  $\gamma$ -кванты были получены с использованием мишенного устройства, состоящего из тормозной мишени из вольфрама с толщиной фольги 2 мм и 25-мм алюминиевого поглотителя электронов.

В аналогичных условиях была облучена камера ННРС без Pd-стержня, но при давлении молекулярного водорода 1000 бар. Результаты, полученные в этом эксперименте, представлены в работах [18, 19].

После облучения камера ННРС была помещена в германиевый детектор для измерения спектров  $\gamma$ -квантов из облученной камеры. Полученные в этих измерениях результаты будут представлены в одной из следующих работ.

При вскрытии камеры ННРС из латунной втулки (рис. 1, поз. 8) на специально подготовленный предметный столик выпала одна светлая частица с размерами менее 1,5 мм на 0,75 мм.

Латунная втулка (рис. 1, б, поз. 8) после пятидневного выдерживания для спада наведенной активности была разрезана на две половинки с целью исследований методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) изменений структуры и с помощью рентгеновского зондового микроэлементного анализа (РЗМА) изменений элементного состава обеих внутренних поверхностей втулки.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

**2.1. Входное окно (ВО) из бериллиевой бронзы (рис. 1, поз. 4).** На рис. 2 представлены СЭМ-изображения внутренней поверхности ВО, которое имело контакт с водородом при давлении 500 бар, со структурами на ней, одна из которых представлена на рис. 2, б.

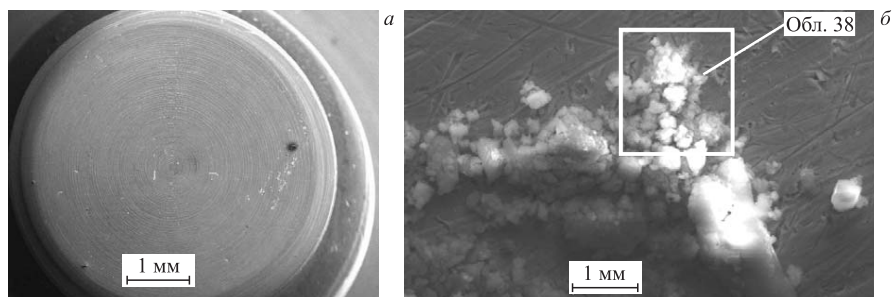


Рис. 2. СЭМ-изображение ВО (а) и его увеличенное СЭМ-изображение с комплексом структур на поверхности (б)

На рис. 3 представлен спектр РМЗА-структуры на поверхности ВО, измеренный в обл. 38 на рис. 2, б. В табл. 1 приведена концентрация элементов, измеренная РМЗА на рис. 2, б в обл. 38.

Как видно, рыхлая структура на поверхности ВО состоит из меди с четко выделенными пиками от С, О, Al, Si и Са. Причем кальция имеется значительное количество (10,18 вес. %, или 8,92 ат. %) наряду с кислородом

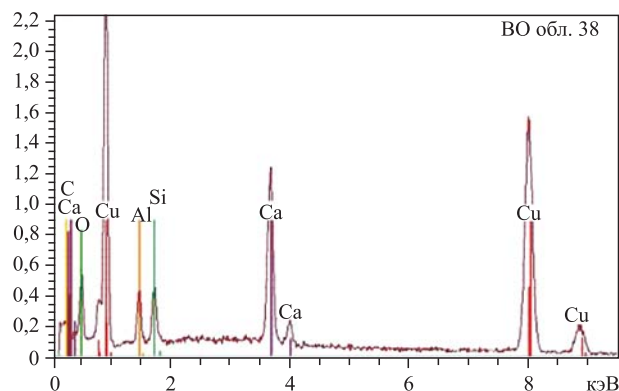


Рис. 3. Спектр РМЗА, измеренный на рис. 2, б в обл. 38 ВО

**Таблица 1. Концентрация элементов, измеренная РМЗА на рис. 2, б в обл. 38**

Элемент	Серия	$(C \pm \Delta C)$ , вес. %	$C$ , ат. %
Углерод	К	$8,57 \pm 3,89$	25,06
Кислород	К	$10,65 \pm 3,66$	23,38
Алюминий	К	$2,60 \pm 0,32$	3,39
Кремний	К	$2,35 \pm 0,27$	2,94
<b>Кальций</b>	<b>К</b>	<b><math>10,18 \pm 0,61</math></b>	<b>8,92</b>
Медь	К	$65,66 \pm 3,22$	36,31

(23,38 ат. %) и углеродом (25,06 ат. %). Присутствующий в составе материала входного окна бериллий (2–4 ат. %) использованным в измерениях РМЗА-спектрометром не регистрируется.

На рис. 4 представлены два участка на поверхности ВО с расположенными на них структурами, в обл. 39 и обл. 40 которых проведены РМЗА, а соответствующие спектры представлены на рис. 5, а и б соответственно.

В табл. 2 приведены концентрации элементов, полученные РМЗА в обл. 39 на рис. 4, а и обл. 40 на рис. 4, б.

Отметим, что в обл. 39 присутствуют надежно зарегистрированные пики от легких элементов:  ${}^6\text{C}$ ,  ${}^7\text{N}\uparrow$ ,  ${}^8\text{O}$ ,  ${}^9\text{F}\uparrow$ ,  ${}^{10}\text{Ne}\uparrow$ ,  ${}^{11}\text{Na}$ ,  ${}^{12}\text{Mg}$ ,  ${}^{13}\text{Al}$ ,  ${}^{14}\text{Si}$ ,  ${}^{15}\text{P}$ ,  ${}^{16}\text{S}$ ,  ${}^{17}\text{Cl}$ ,  $\text{Ag}\uparrow$ ,  ${}^{19}\text{K}$ , и очень много  ${}^{20}\text{Ca}$  (25,35 вес. %, или 16,28 ат. %), а в обл. 40 практически те же самые элементы:  ${}^6\text{C}$ ,  ${}^7\text{N}\uparrow$ ,  ${}^8\text{O}$ ,  ${}^9\text{F}\uparrow$ ,  ${}^{10}\text{Ne}\uparrow$ ,  ${}^{11}\text{Na}$ ,  ${}^{13}\text{Al}$ ,  ${}^{14}\text{Si}$ ,  ${}^{15}\text{P}$ ,  ${}^{16}\text{S}$ ,  ${}^{17}\text{Cl}$ ,  $\text{Ag}\uparrow$ ,  ${}^{19}\text{K}$  и  ${}^{20}\text{Ca}$ . Здесь в эти два ряда вставлены, возможно, присутствовавшие в камере ННРС перед вскрытием летучие элементы, не вступившие в химические соединения, такие как  ${}^7\text{N}\uparrow$ ,  ${}^9\text{F}\uparrow$ ,  ${}^{10}\text{Ne}\uparrow$ , и  $\text{Ag}\uparrow$ .

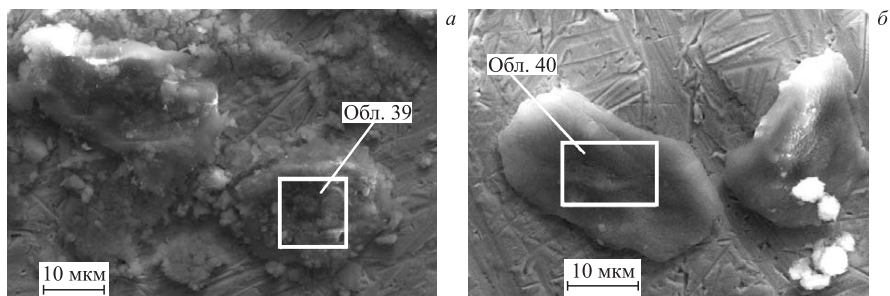


Рис. 4. Два участка ВО с отмеченными обл. 39 и обл. 40, где выполнен РМЗА

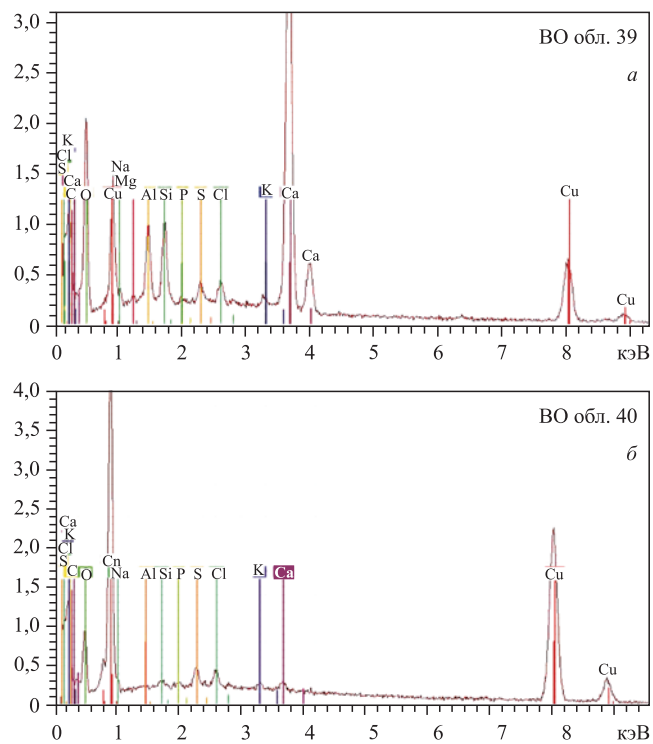


Рис. 5. Спектры РМЗА, измеренные в обл. 39 и обл. 40 на рис. 4, а и б соответственно

На рис. 6, а представлено СЭМ-изображение скопления мелких светлых частиц с размерами менее 3 мкм, в т. 41 самого крупного объекта был сделан РМЗА, спектр которого приведен на рис. 6, б.

**Таблица 2. Концентрация элементов, измеренная РМЗА на рис. 4, а и б в обл. 39 и 40 соответственно**

Элемент	Серия	$(C \pm \Delta C)$ , вес. %	$C$ , ат. %	$(C \pm \Delta C)$ , вес. %	$C$ , ат. %
		Область 39, рис. 4, а		Область 40, рис. 4, б	
Кислород	К	40,67 ± 7,61	65,42	9,53 ± 2,11	28,55
Натрий	К	0,79 ± 0,15	0,88	0,65 ± 0,13	1,36
Магний	К	0,61 ± 0,11	0,65	—	—
Алюминий	К	3,22 ± 0,27	3,07	0,11 ± 0,07	0,20
Кремний	К	2,44 ± 0,20	2,24	0,36 ± 0,08	0,62
Фосфор	К	0,02 ± 0,05	0,02	0,09 ± 0,06	0,14
Сера	К	0,55 ± 0,09	0,44	0,91 ± 0,11	1,37
Хлор	К	0,69 ± 0,09	0,50	0,91 ± 0,10	1,24
Калий	К	0,43 ± 0,08	0,28	0,41 ± 0,08	0,50
<b>Кальций</b>	<b>К</b>	<b>25,35 ± 1,01</b>	<b>16,28</b>	0,80 ± 0,10	0,96
Железо	К	0,28 ± 0,08	0,13	—	—
Медь	К	23,66 ± 0,96	9,58	86,22 ± 2,92	65,06
Цинк	К	1,30 ± 0,17	0,51	—	—

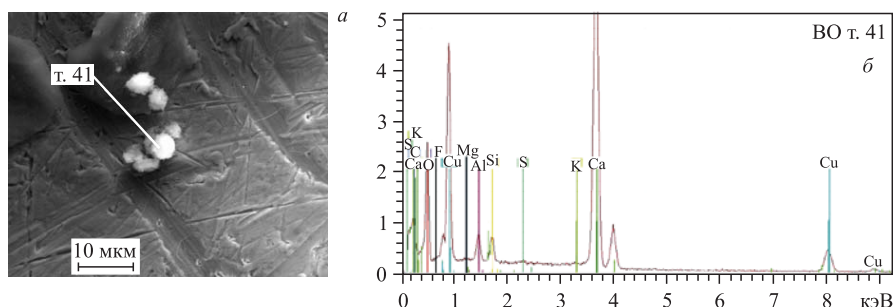


Рис. 6. Изображение скопления частиц на поверхности ВО с выделенной т. 41, где выполнен РМЗА, и спектр РМЗА (б)

Из рис. 6, б отчетливо видно, что одна из светлых частиц на поверхности ВО с размерами примерно 3,6 мкм состоит преимущественно из кальция (37,78 вес. %, или 18,59 ат. %) с примесями  ${}^6\text{C}$ ,  ${}^8\text{O}$ ,  ${}^9\text{F}$ ,  ${}^{12}\text{Mg}$ ,  ${}^{13}\text{Al}$ ,  ${}^{14}\text{Si}$ ,  ${}^{16}\text{S}$ ,  ${}^{19}\text{K}$  при толщине частицы достаточно значительной, так как основной материал ВО медь слабо проявляется (пики меди получены при низкой интенсивности луча СЭМ при энергии электронов 20 кэВ).

В табл. 3 представлены концентрации элементов, полученные РМЗА в т. 41 на рис. 6, а.



Таблица 3. Концентрация элементов, измеренная РМЗА на рис. 6, а в т. 41

Элемент	Серия	$(C \pm \Delta C)$ , вес. %	$C$ , ат. %
Кислород	К	$46,10 \pm 10,17$	67,55
<b>Фтор</b>	<b>К</b>	<b><math>5,34 \pm 1,83</math></b>	<b>6,59</b>
Магний	К	$0,06 \pm 0,06$	0,06
Алюминий	К	$1,06 \pm 0,14$	0,92
Кремний	К	$0,94 \pm 0,12$	0,78
Сера	К	$0,15 \pm 0,07$	0,11
Калий	К	$0,10 \pm 0,06$	0,06
<b>Кальций</b>	<b>К</b>	<b><math>37,78 \pm 1,59</math></b>	<b>18,59</b>
Медь	К	$14,47 \pm 0,77$	5,34

Особо обращает внимание присутствие в значительном количестве фтора ( $5,34$  вес. %, или  $6,59$  ат. %); ясно, что фтор может находиться только в химически связанном состоянии в светлой структуре на рис. 6, а.

На рис. 7, а представлено СЭМ-изображение структуры типа тонкостенной трубки с раструбом (а) и ее увеличенное СЭМ-изображение, в обл. 42 которой сделан РМЗА, а измеренный спектр представлен на рис. 8. Отметим, что на увеличенном изображении трубки (рис. 7, б) видно, что эта трубка представляет собой свернутую из плоской структуру, скорее всего с малой толщиной. Кроме того, при измерении спектра РМЗА трубка изменила свой диаметр в месте измерения — несколько сжалась при воздействии на нее электронного пучка, что хорошо видно на рис. 7, б.

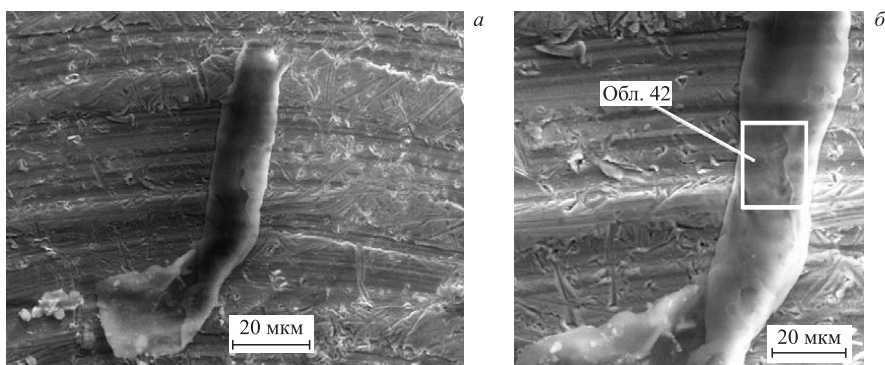


Рис. 7. СЭМ-изображение трубки на поверхности ВО (а) с частью трубки с большим увеличением из выделенной обл. 42, где выполнен РМЗА (б)

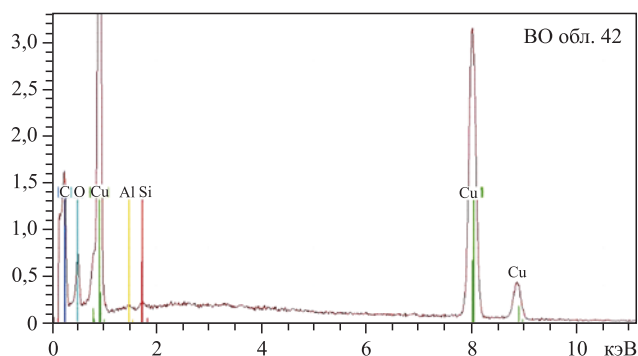


Рис. 8. Спектр РМЗА, измеренный в обл. 42 на рис. 7, б

Размеры трубки с расширенной частью снизу на рис. 7, а составляют: длина примерно 92,3 мкм, ширина в средней части 15,4 мкм. Область, в которой снимался рентгеновский спектр на рис. 8, имеет размеры 8,8 мкм на 12,0 мкм. При этом в РМЗА-спектре помимо интенсивных пиков от меди присутствуют более слабые пики углерода и кислорода, а также пики с низкой интенсивностью от алюминия и кремния. Отсюда можно сделать вывод, что эта трубка тонкостенная.

На рис. 9, а представлено СЭМ-изображение частицы сложной формы с длиной более 23 мкм, шириной 11,5 мкм на поверхности ВО в т. 43, в которой был сделан РМЗА, а на рис. 9, б — спектр РМЗА.

Эта частица содержит большое количество цинка с присутствием углерода, кислорода и в меньших количествах кремния и серы. Присутствующая медь, возможно, регистрируется из подложки. А соотношение меди и цинка в составе частицы близко к соотношению этих элементов в исходной латуни, из которой сделаны втулка и сборник (рис. 1, поз. 8 и 10 соответственно).

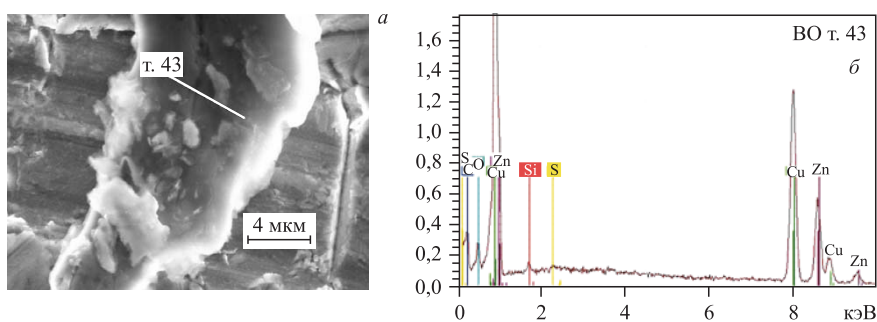


Рис. 9. Изображение частицы на поверхности ВО в выделенной т. 43, где выполнен РМЗА (а), и спектр (б), измеренный в т. 43

На рис. 10 представлена частица с размерами примерно 32 мкм на 36 мкм, покрытая светлыми частицами меньшего размера.

Помимо материала входного окна — меди, в измеренной области (рис. 10, б) присутствуют хорошо проявившиеся пики от С, О, Al, Si, S, Ca, Fe и, возможно, фтора.

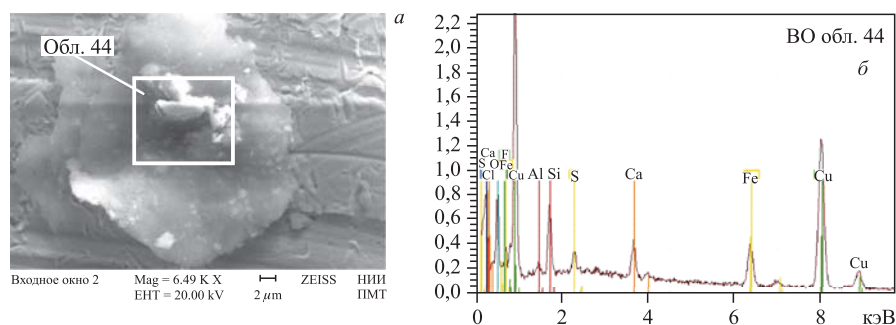


Рис. 10. СЭМ-изображения частицы на поверхности ВО с более мелкими структурами (а) и спектр РМЗА (б), измеренным в обл. 44

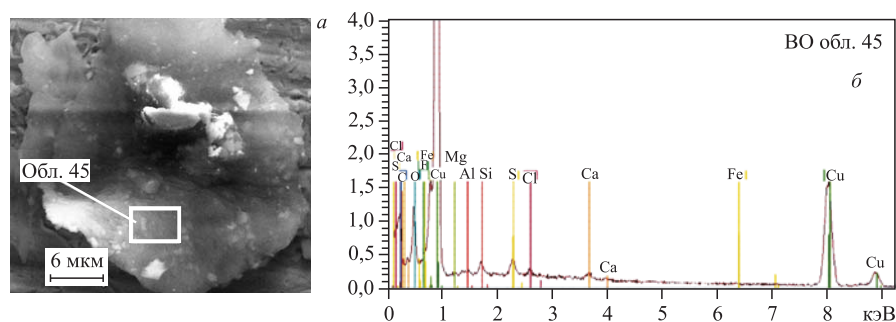


Рис. 11. СЭМ-изображение частицы на поверхности ВО (а) и спектр РМЗА в обл. 45 (б)

На рис. 11, а приведено изображение той же частицы, но с РМЗА в обл. 45, спектр которого представлен на рис. 11, б.

В измеренной области (рис. 11, б) присутствуют хорошо проявившиеся пики от С, О, Mg, Al, Si, S, С, Ca и, как и на рис. 10 а, проявился химически связанный фтор, а пик от железа практически пропал.

**2.2. Исследование аномалий Pd-стержня (рис. 1, поз. 9).** 2.2.1. Боковая поверхность Pd-стержня. На рис. 12 представлена боковая поверхность (а) и увеличенное изображение трещины (б) на поверхности Pd-стержня (б) из выделенной обл. 22, где сделан РМЗА (б).

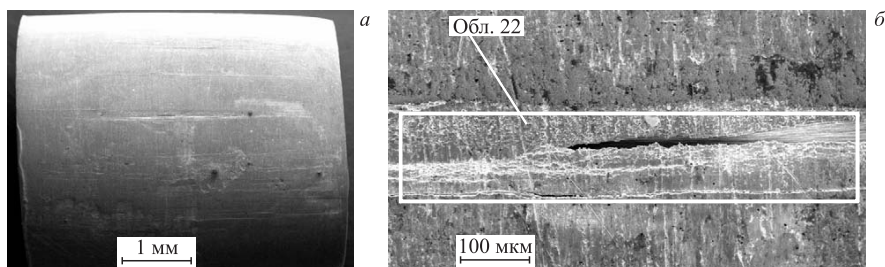


Рис. 12. СЭМ-изображения боковой поверхности Pd-стержня (а) и увеличенное изображение трещины на боковой поверхности и обл. 22 РМЗА (б)

Как видно, Pd-стержень претерпел изменения, его форма приобрела бочковатый вид, и образовались трещины. Спектр РМЗА, измеренный в обл. 22 на рис. 12, б, представлен на рис. 13, а в табл. 4 дан соответствующий элементный состав.

Видно из рис. 13, б и табл. 4, что в обл. 22 на площади с размерами 643 мкм на 130 мкм боковой поверхности палладия присутствуют заметные концентрации С, О, Al, Si и особенно меди (2,87 вес. %, или 3,74 ат. %).

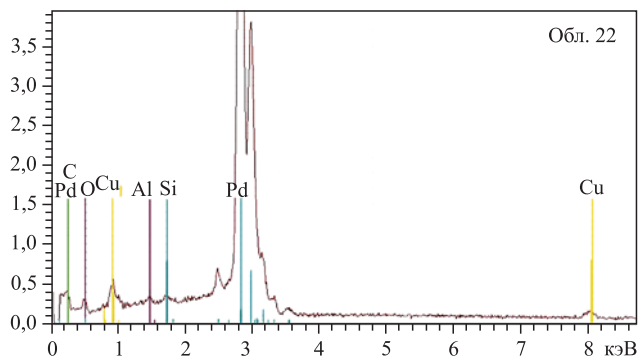


Рис. 13. Спектр РМЗА в обл. 22 на рис. 12, б

Таблица 4. Концентрация элементов, измеренная РМЗА на рис. 12, б в обл. 22

Элемент	Серия	$(C \pm \Delta C)$ , вес. %	C, ат. %
Кислород	К	$4,42 \pm 11,55$	22,88
Алюминий	К	$0,25 \pm 0,08$	0,76
Кремний	К	$0,32 \pm 0,08$	0,94
Медь	К	$2,87 \pm 0,23$	3,74
Палладий	L	$92,14 \pm 4,47$	71,69

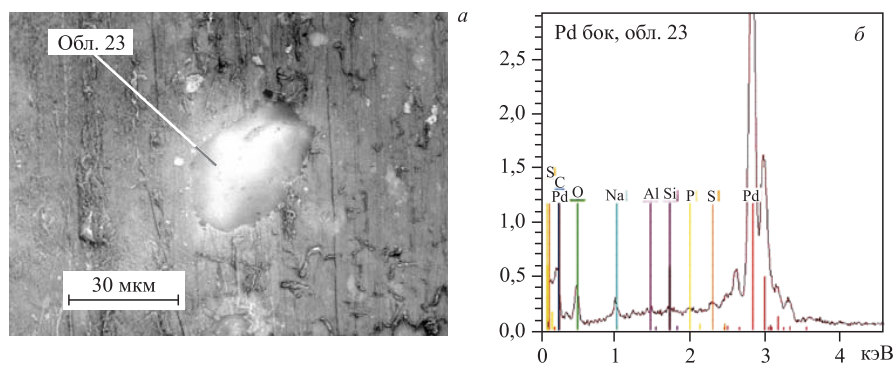


Рис. 14. СЭМ-изображение частицы на поверхности Pd-стержня (а) и РМЗА-спектр, измеренный в обл. 23 (б)

На рис. 14 представлено СЭМ-изображение частицы на поверхности Pd-стержня (а) и спектр РМЗА, измеренный в обл. 23 (б).

На рис. 14, а сделано обращение цветов (светлые цвета стали темными, а темные цвета стали светлыми). Видно, что края частицы с размерами 27,5 мкм на 37,5 мкм плотно прилегают к поверхности, а вокруг частицы имеется ореол того же цвета, что и сама частица. В табл. 5 приведен элементный состав этой частицы.

**Таблица 5. Концентрация элементов, измеренная РМЗА на рис. 14, а в обл. 23**

Элемент	Серия	$(C \pm \Delta C)$ , вес. %	C, ат. %
Углерод	К	$5,69 \pm 1,40$	21,35
Кислород	К	$14,49 \pm 3,47$	40,83
Натрий	К	$1,73 \pm 0,23$	3,40
Алюминий	К	$0,25 \pm 0,08$	0,43
Кремний	К	$0,32 \pm 0,08$	0,51
Фосфор	К	$0,08 \pm 0,06$	0,11
Сера	К	$0,59 \pm 0,09$	0,83
Палладий	L	$76,84 \pm 3,07$	32,54

Эта частица содержит следующие химические элементы: С, О, Na ( $1,73$  вес. %, или  $3,40$  ат. %), Al, Si, P, S и, естественно, материал стержня Pd.

На рис. 15 представлено СЭМ-изображение другой частицы (с размерами  $18,5$  мкм на  $25,0$  мкм) на поверхности Pd-стержня (а) и спектр РМЗА, измеренный в обл. 24 (б), а соответствующий элементный состав приведен в табл. 6.

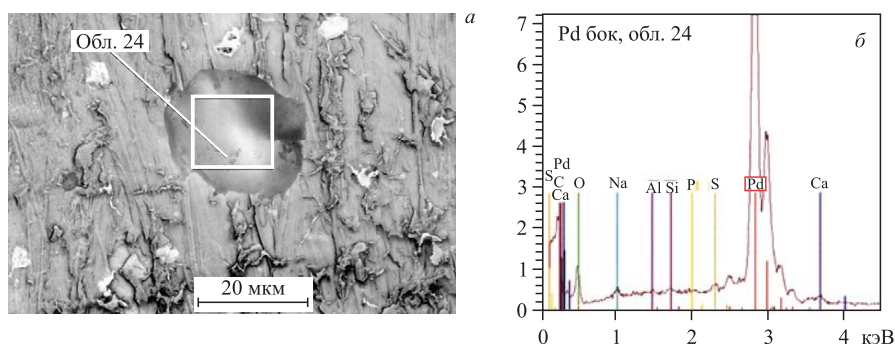


Рис. 15. СЭМ-изображение частицы на поверхности Pd-стержня (а) и спектр РМЗА, измеренный в обл. 24 (б)

Таблица 6. Концентрация элементов, измеренная РМЗА на рис. 15, а в обл. 24

Элемент	Серия	$(C \pm \Delta C)$ , вес. %	$C$ , ат. %
Углерод	К	$9,04 \pm 1,79$	31,35
Кислород	К	$13,69 \pm 2,96$	35,40
Натрий	К	$1,01 \pm 0,16$	1,83
Алюминий	К	$0,05 \pm 0,06$	0,08
Кремний	К	$0,26 \pm 0,07$	0,38
Фосфор	К	$0,05 \pm 0,06$	0,07
Сера	К	$0,41 \pm 0,08$	0,53
Кальций	К	$1,20 \pm 0,12$	1,25
Палладий	L	$74,40 \pm 3,07$	29,13

Здесь также сделано обращение цветов. Из табл. 6 видно, что эта частица, также с плотно прилегающими к поверхности краями, содержит практически тот же широкий набор легких химических элементов, что и на рис. 14, а именно: С, О, Na, Mg, Al, Si, P, S, Ca и, естественно, Pd — материал стержня, что свидетельствует о том, что такие частицы не привнесены извне, а образовались непосредственно в ННРС в результате реакций с участием  $\gamma$ -квантов, плотного водорода (при давлении 0,5 кбар) и, возможно, без участия Pd-стержня (см. также результаты в работе [18, 19]).

На рис. 16 приведено СЭМ-изображение кластера, облепленного более мелкими светлыми частицами, как единого целого с размерами 8,6 мкм на 7,6 мкм (а), и спектр РМЗА, который сделан в обл. 25 (б). В табл. 7 представлен элементный состав в обл. 25.

Эта частица содержит более мелкие структуры с видимой кристаллической огранкой. Состав этой частицы — набор легких химических элементов,

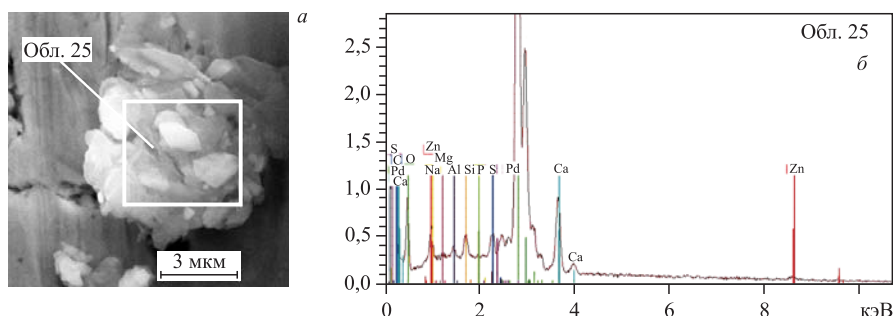


Рис. 16. СЭМ-изображение частицы на поверхности Pd-стержня (а) и спектр РМЗА, измеренный в обл. 25 (б)

Таблица 7. Концентрация элементов, измеренная РМЗА на рис. 16, а в обл. 25

Элемент	Серия	$(C \pm \Delta C)$ , вес. %	C, ат. %
Углерод	К	$9,27 \pm 1,64$	28,02
Кислород	К	$17,78 \pm 3,23$	40,34
Натрий	К	$0,14 \pm 0,07$	0,23
Алюминий	К	$0,32 \pm 0,08$	0,43
Кремний	К	$0,24 \pm 0,07$	0,31
Фосфор	К	$0,04 \pm 0,06$	0,05
Сера	К	$0,59 \pm 0,08$	0,66
Кальций	К	$9,18 \pm 0,38$	8,32
Цинк	К	$1,63 \pm 0,16$	0,91
Палладий	L	$60,80 \pm 2,24$	20,74

похожий состав тот, что измерен для частиц на рис. 14, а и 15, а, а именно: С, О, Na, Al, Si, P, S, большое количество Ca (9,18 вес. %, или 8,32 ат. %), Pd и присутствует цинк (1,63 вес. %).

На рис. 17, а представлено СЭМ-изображение частицы круглой формы с диаметром 27 мкм и примерно таким же составом, что и состав частиц на рис. 14, б, 15, б и 16, б. На рис. 17, б дано СЭМ-изображение участка поверхности Pd-стержня с мелкими светлыми образованиями сложной формы (б), для одного из которых в обл. 26, сделан РМЗА.

Спектр РМЗА, измеренный в обл. 26, приведен на рис. 18, а соответствующий элементный состав представлен в табл. 8.

Из рис. 18 видно, что эти мелкие частицы (с размерами в несколько мкм) состоят из С, О, Al, Si, P, а также вновь из Fe (0,55 вес. %, или 0,63 ат. %) и Zn (2,81 вес. %, или 2,73 ат. %).

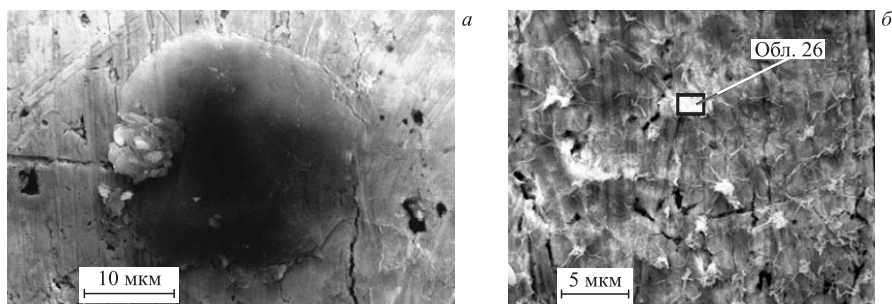


Рис. 17. СЭМ-изображения частицы (а) и участка поверхности Pd-стержня с мелкими частицами и РМЗА, проведенным в обл. 26 (б)

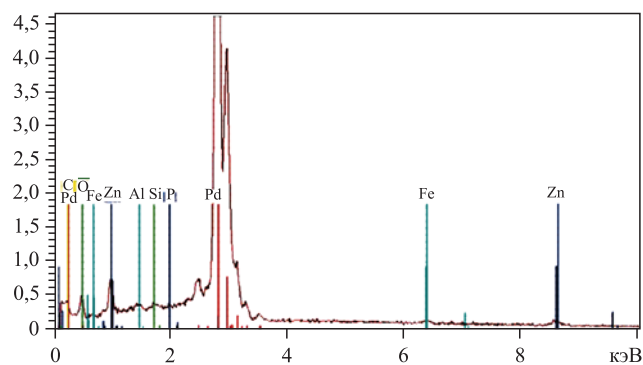


Рис. 18. Спектр РМЗА в обл. 26 на рис. 17, б

Таблица 8. Концентрация элементов, измеренная РМЗА на рис. 17, б в обл. 26

Элемент	Серия	$(C \pm \Delta C)$ , вес. %	C, ат. %
Углерод	K	$1,31 \pm 0,48$	6,92
Кислород	K	$9,47 \pm 2,47$	37,67
Алюминий	K	$0,19 \pm 0,07$	0,44
Кремний	K	$0,14 \pm 0,07$	0,31
Фосфор	K	$0,11 \pm 0,06$	0,22
Железо	K	$0,55 \pm 0,10$	0,63
Цинк	K	$2,81 \pm 0,23$	2,73
Палладий	L	$85,42 \pm 3,87$	51,07

2.2.2. Поверхности Pd-стержня в месте входа и выхода  $\gamma$ -квантов. Исследование структуры поверхности и элементного состава Pd-стержня в местах входа и выхода  $\gamma$ -квантов было проведено в другом аналитическом



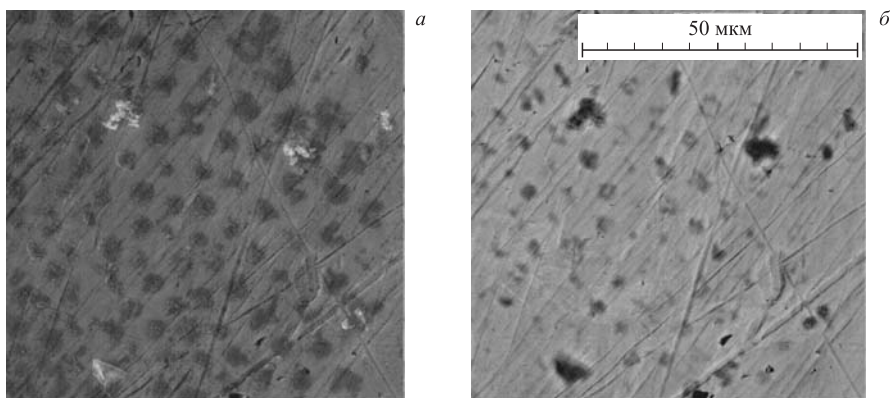


Рис. 19. СЭМ-изображение части поверхности Pd-стержня во вторичных (*а*) и отраженных (*б*) электронах

центре с более современным СЭМ и рентгеновским анализатором. На рис. 19 представлена часть поверхности Pd-стержня во вторичных (*а*) и отраженных (*б*) электронах.

На рис. 20 представлены СЭМ-изображения места разрыва поверхности Pd-стержня с меньшим ( $\times 2240$  — *а*) и большим ( $\times 10700$  — *б*) увеличением.

На рис. 21, *а* представлено СЭМ-изображение участка поверхности Pd-стержня в месте расположения темных пятен (см. рис. 19), РМЗА выполнен на всей площади изображения, а РМЗА-спектр представлен на рис. 21, *б*.

В табл. 9 показаны концентрации элементов, измеренные на рис. 21, *а*.

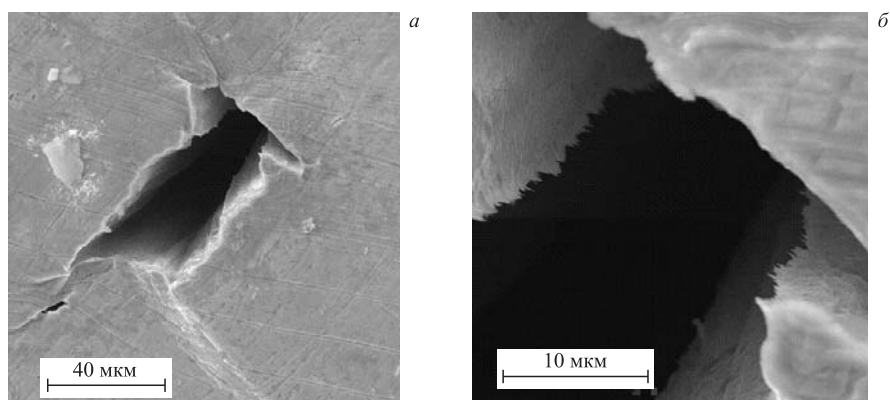


Рис. 20. СЭМ-изображения места разрыва поверхности Pd-стержня *а*) с меньшим ( $\times 2240$ ) и *б*) большим ( $\times 10700$ ) увеличением

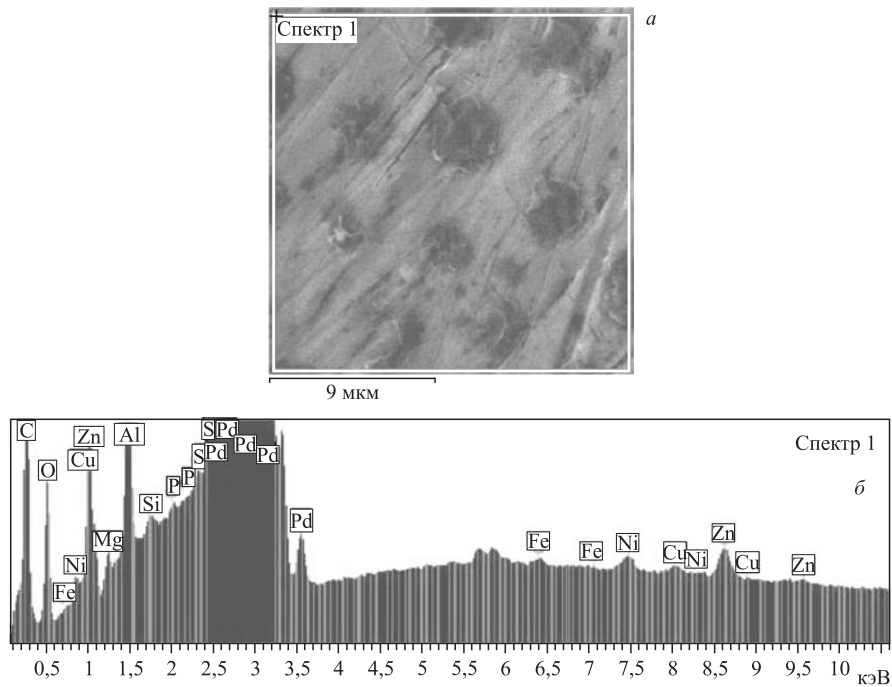


Рис. 21. СЭМ-изображение участка поверхности Pd-стержня в месте расположения темных пятен (а) и РМЗА-спектр со всей площади изображения (б)

**Таблица 9. Концентрации элементов, измеренные РМЗА на рис. 21, а на всей площади**

Элемент	Серия	C, вес. %	C, ат. %
Углерод	К	3,31	14,62
Кислород	К	11,98	39,71
Магний	К	0,43	0,93
Алюминий	К	1,50	2,94
Кремний	К	0,10	0,09
Фосфор	К	0,05	0,22
Сера	К	0,03	0,05
Железо	К	0,08	0,08
Никель	К	0,17	0,15
Медь	К	0,11	0,09
Цинк	К	0,52	0,42
Палладий	L	81,72	40,73

На рис. 22, *а* приведено СЭМ-изображение одиночного темного пятна, вдоль полосы на котором был сделан РМЗА, спектры элементов которого приведены на рис. 22, *б*.

Как видно, темное пятно состоит из кислорода (до 25 отн. ед.) и цинка (до 25 отн. ед.) с четко выраженным спадом обеих концентраций на границах

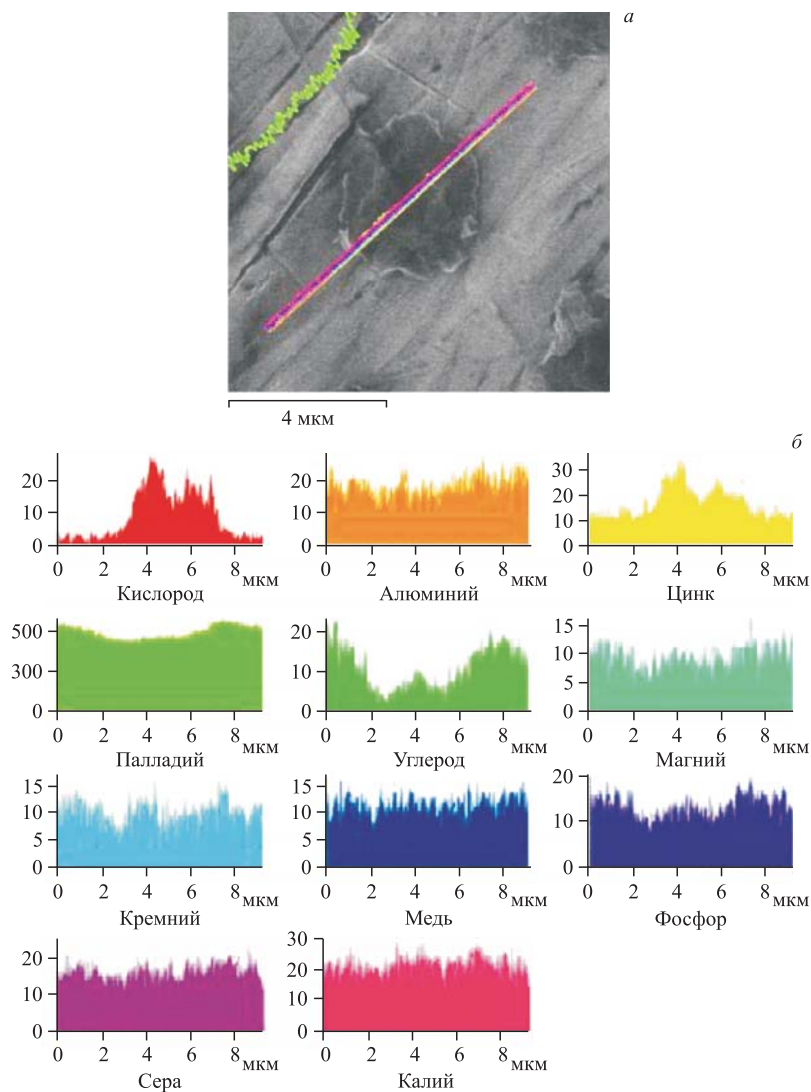


Рис. 22. СЭМ-изображение одиночного темного пятна, вдоль полосы на котором был сделан РМЗА (*а*), и спектры элементов (*б*)

пятна. Это пятно имеет значительную толщину, что видно по уменьшению концентраций других элементов в области подложки под пятном, таких как палладий (до 600 отн. ед.), углерод (до 20 отн. ед.), магний (до 13 отн. ед.), алюминий (до 20 отн. ед.), кремний (до 15 отн. ед.), фосфор (до 17 отн. ед.), сера (до 18 отн. ед.), калий (до 28 отн. ед.) и медь (до 16 отн. ед.). Видимо, это темное пятно содержит соединение типа ZnO.

**2.3. Манганиновая разделительная фольга (рис. 1, поз. 10).** На рис. 23 представлен спектр РМЗА, измеренный на неизменном участке манганиновой фольги (см. [18]). В табл. 10 приведен соответствующий элементный состав, измеренный РМЗА. Из табл. 10 видно, что отношение относительных концентраций меди, марганца и никеля в манганине составляет  $C_{Cu} : C_{Mn} : C_{Ni} = 83,36 : 13,50 : 3,14 \%$ . Это отношение близко к измеренному в работе [19], которое составляет  $C_{Cu} : C_{Mn} : C_{Ni} = 86,6 : 10,99 : 2,80 \%$ .

На рис. 24 представлено СЭМ-изображение тонкостенной трубки, край которой не завернулся до конца (а), и концентрации отдельных элементов (б), полученные сканированием по отмеченной полосе на рис. 24, а.

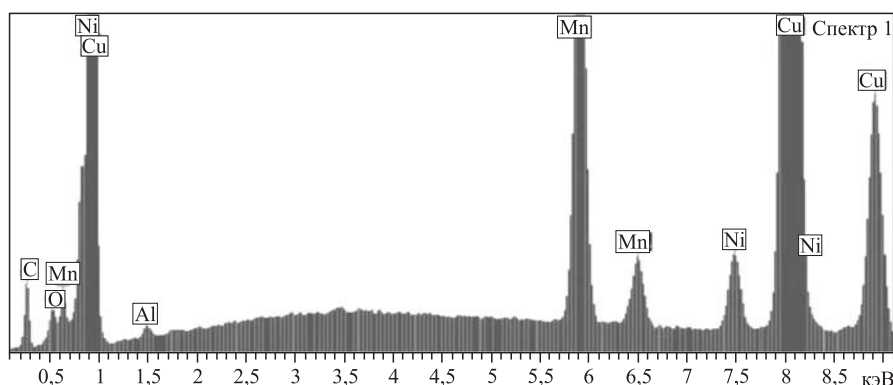


Рис. 23. Спектр РМЗА во внешне не измененной области манганиновой фольги

**Таблица 10. Концентрации элементов, измеренные РМЗА на неизмененной области манганиновой фольги**

Элемент	Серия	$C$ , вес. %	$C$ , ат. %
Углерод	К	18,57	52,09
Кислород	К	2,23	4,69
Алюминий	К	0,45	0,56
Марганец	К	9,38	5,76
Никель	К	2,33	1,34
Медь	К	67,05	35,56

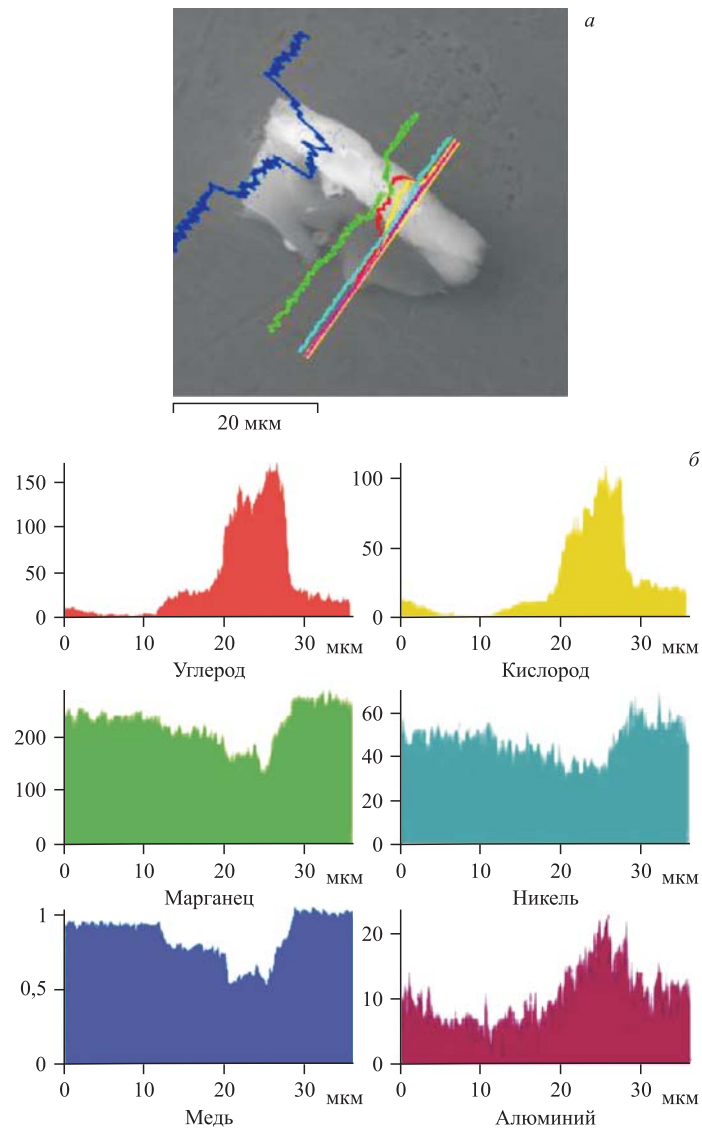


Рис. 24. СЭМ-изображение тонкостенной трубки, край которой не завернулся до конца (а), и концентрации отдельных элементов, полученные сканированием по выделенной на рис. а полосе (б)

Как видно, трубка в поперечном размере состоит из углерода (до 160 отн. ед.), кислорода (до 110 отн. ед.) и алюминия (до 22 отн. ед.) с четко выраженным спадом всех трех концентраций элементов на границах

трубки. А подложка, как и должно быть, состоит из меди (до 950 отн. ед.), марганца (до 270 отн. ед.) и никеля (до 70 отн. ед.). Если взять отношения их относительных концентраций, то получим  $C_{Cu}$  (отн. ед.):  $C_{Mn}$  (отн. ед.):  $C_{Ni}$  (отн. ед.) = 73,6 : 20,9 : 5,5. Несмотря на значительную толщину трубки, примерно: 7,0 мкм, сигнал от манганина (подложки) ослабляется мало.

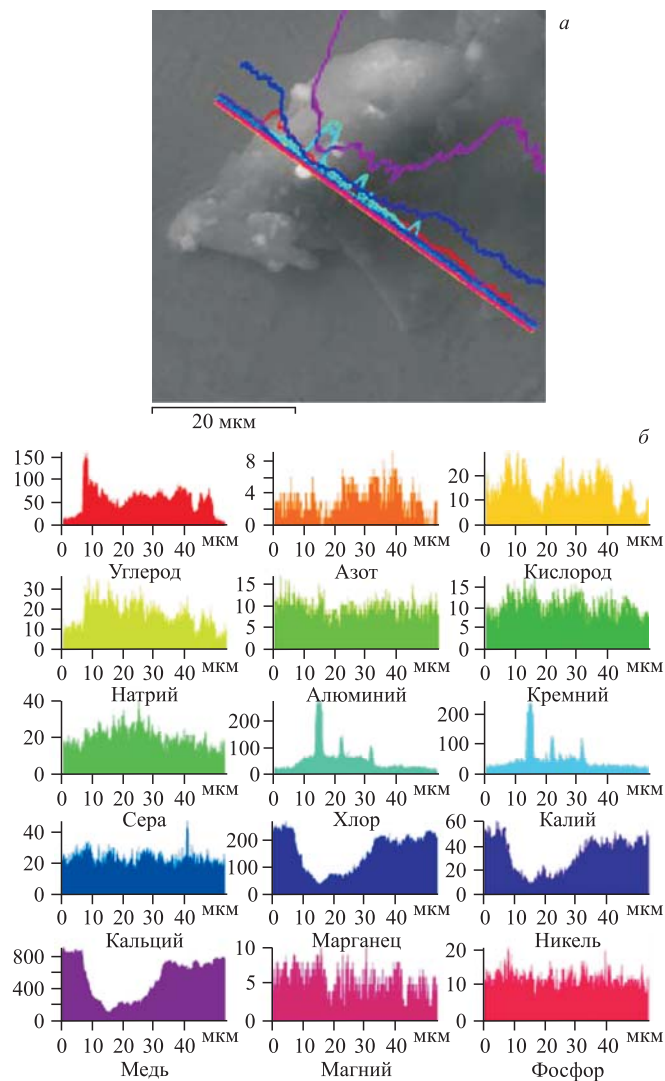


Рис. 25. СЭМ-изображение структуры (а) и концентрации отдельных элементов, полученные сканированием по выделенной полосе (б) на рис. 25, а

На рис. 25, *а* представлено СЭМ-изображение структуры, покрытой светлыми вкраплениями, на котором вдоль выделенной полосы проведен РМЗА, а концентрации измеренных в полосе элементов представлены на рис. 25, *б*. На рис. 26 приведен суммарный спектр ХСРИ, соответствующий элементному составу на рис. 25, *б*. В табл. 11 представлен элементный состав, полученный РМЗА при сканировании по полосе на рис. 25, *а*. Как видно из концентрационных зависимостей на рис. 25, *б*, найденная структура имеет значительную толщину, что следует из провала в концентрации меди (от 900 до 100 отн. ед.) и состоит из: углерода (до 150 отн. ед.), кислорода (до 26 отн. ед.), натрия (до 30 отн. ед.), магния (до 10 отн. ед.), кремния (до 15 отн. ед.), фосфора (до 20 отн. ед.), серы (до 30 отн. ед.) и кальция (до 30 отн. ед.). Светлая

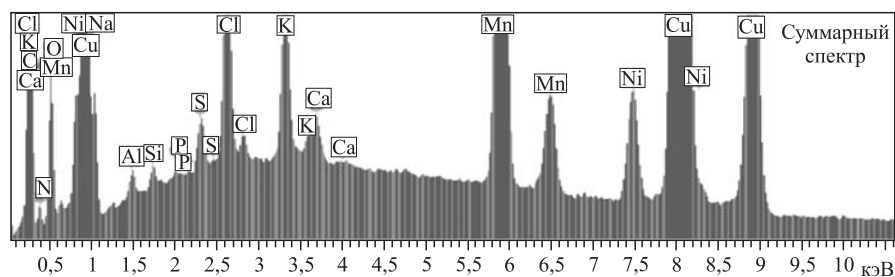


Рис. 26. Суммарный спектр РМЗА, соответствующий элементному составу при сканировании по полосе на рис. 25, *а*

Таблица 11. Концентрации элементов, измеренные РМЗА в полосе на рис. 25, *а*

Элемент	Серия	<i>C</i> , вес. %	<i>C</i> , ат. %
Углерод	К	51,49	75,43
Азот	К	3,76	4,73
Кислород	К	7,28	8,00
Натрий	К	1,60	1,23
Алюминий	К	0,16	0,10
Кремний	К	0,10	0,06
Фосфор	К	0,03	0,02
Сера	К	0,19	0,10
Хлор	К	0,97	0,48
Калий	К	0,56	0,25
Кальций	К	0,14	0,06
Марганец	К	4,09	1,31
Никель	К	1,01	0,30
Медь	К	28,63	7,93

структура включает в себя хлор (до 260 отн. ед.) и калий (до 230 отн. ед.) помимо остальных легких элементов, которые в ней также могут присутствовать.

Как видно из табл. 11, в обнаруженной структуре присутствует азот (3,76 вес. %, или 4,76 ат. %), который может находиться только в химически связанном состоянии. Соотношение относительных концентраций меди, марганца и никеля в манганине составляет  $C_{Cu} : C_{Mn} : C_{Ni} = 83,12 : 13,73 : 3,14$ . Это соотношение весьма близко к исходному манганину.

На рис. 27, *a* представлено СЭМ-изображение другой структуры, сложной формы, на которой сделан РМЗА в выделенной области. На рис. 27, *б* представлен характеристический спектр рентгеновского излучения (ХСРИ). В табл. 12 представлен элементный состав, полученный РМЗА с выделенной площади на рис. 27, *a*.

В обнаруженной структуре (рис. 27, *a*) также присутствует азот (5,39 вес. %, или 6,55 ат. %), который может находиться только в химически связанном состоянии. Соотношение относительных концентраций меди, марганца и никеля в манганине составляет  $C_{Cu} : C_{Mn} : C_{Ni} = 81,29 : 15,48 : 3,30$ .

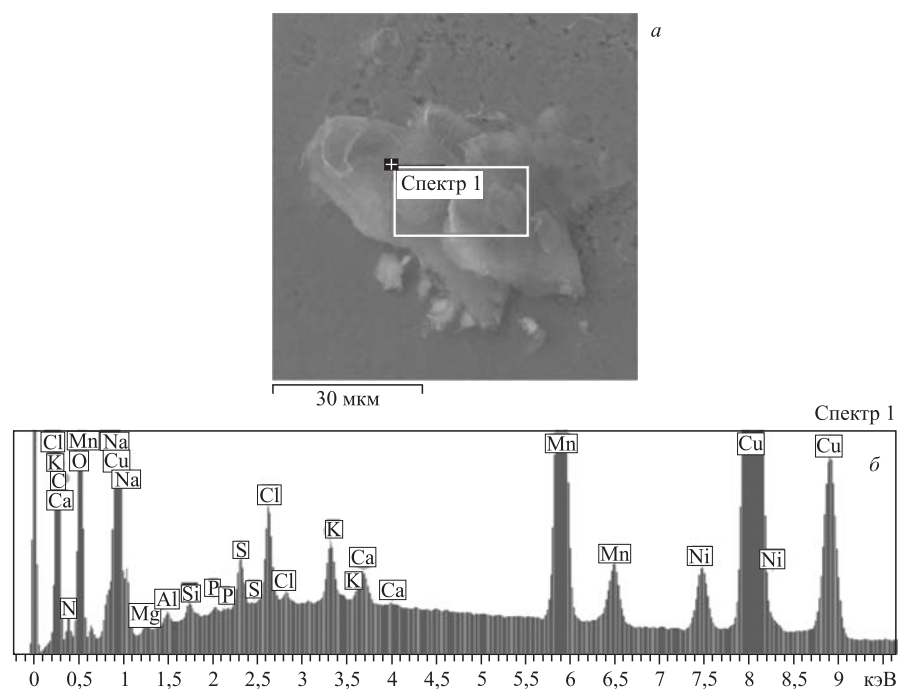


Рис. 27. СЭМ-изображение структуры (*a*) и ХСРИ, полученный с выделенной области (спектр 1) рис. 27, *a* (*б*)



**Таблица 12. Концентрации элементов, измеренные РМЗА в выделенной области (спектр 1) на рис. 27, а**

Элемент	Серия	$C$ , вес. %	$C$ , ат. %
Углерод	К	43,12	61,15
Азот	К	5,39	6,55
Кислород	К	21,92	23,34
Натрий	К	1,02	0,76
Магний	К	0,12	0,09
Алюминий	К	0,10	0,06
Кремний	К	0,10	0,06
Фосфор	К	0,04	0,02
Сера	К	0,26	0,14
Хлор	К	0,49	0,23
Калий	К	0,26	0,12
Кальций	К	0,15	0,06
Марганец	К	3,70	1,15
Никель	К	0,83	0,24
Медь	К	22,51	6,04

На рис. 28, а представлено СЭМ-изображение структуры, округлой формы с более светлыми остатками покрытия. РМЗА сделан в выделенной области (спектр 1). На рис. 28, б приведен спектр ХСРИ. В табл. 13 представлен элементный состав, полученный РМЗА в выделенной области на рис. 28, а.

На рис. 28, б обращает на себя внимание серия линий, которые специально представлены в увеличенном виде, соответствующих олову (0,22 вес. %), т. е. элементу с номером  $Z = 50$ . Здесь соотношение относительных концентраций меди, марганца и никеля в манганине составляет  $C_{Cu} : C_{Mn} : C_{Ni} = 83,28 : 13,68 : 3,04 \%$ .

С целью выяснения распределения олова по частице был дополнительно выполнен РМЗА при сканировании по полосе, представленной на рис. 29, а, а распределения элементов приведены на рис. 29, б.

Можно отметить, что эта частица состоит из углерода (до 35 отн. ед.), кислорода (до 60 отн. ед.) с присутствием кремния (до 16 отн. ед.), алюминия (до 18 отн. ед.) и более или менее однородно распределенного олова (до 40 отн. ед.). А остатки покрытия структуры, видимые в верхней части на рис. 29, а, состоят из углерода и кислорода, что отчетливо видно из выбросов в распределениях этих элементов. Ясно, что эта структура и покрытие на ней должны состоять, скорее всего, из углеводородов, т. е. должен при-

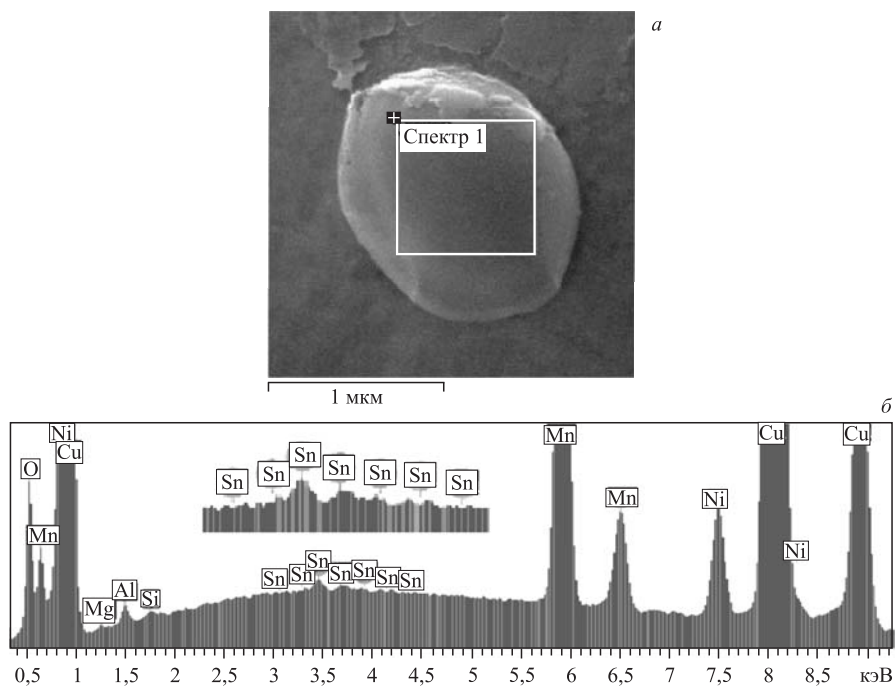


Рис. 28. СЭМ-изображение структуры (а) и спектр ХСРП, полученный в выделенной области (спектр 1) рис. 28, а (б)

Таблица 13. Концентрации элементов, измеренные РМЗА в выделенной области (спектр 1) на рис. 28, а

Элемент	Серия	C, вес. %	C, ат. %
Углерод	К	20,69	50,97
Кислород	К	7,97	14,75
Магний	К	0,13	0,16
Алюминий	К	0,39	0,42
Кремний	К	0,08	0,08
Марганец	К	8,51	4,59
Никель	К	2,03	1,02
Медь	К	59,98	27,94
Олово	L	0,22	0,05

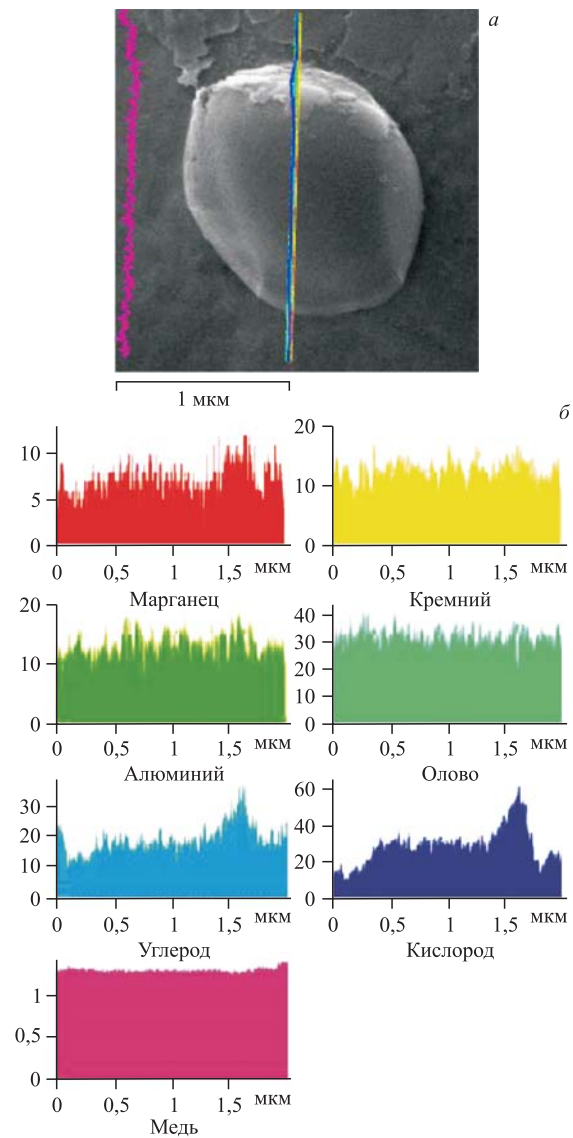


Рис. 29. СЭМ-изображение структуры с полосой сканирования РМЗА (а) и соответствующие распределения элементов (б)

существовать и водород. При этом зарегистрировано удивительно много меди (до 1400 отн. ед.) и мало марганца (только до 12 отн. ед.).

**2.4. Латунный сборник продуктов реакций (рис. 1, поз. 12).** На рис. 30, *a* представлен общий вид латунного сборника, далее ЛС (рис. 1, поз. 12), с несколько измененной центральной частью, вдоль оси камеры ННРС, и видимыми аномалиями (частицами) на поверхности, а на рис. 30, *б* — часть поверхности ЛС слева от оси сборника с большим увеличением и видимыми изменениями.

На рис. 31, *a* представлен участок ЛС с измененной структурой, а в выделенной обл. 27 сделан РМЗА, спектр которого показан на рис. 31, *б*. В табл. 14 представлен соответствующий элементный состав.

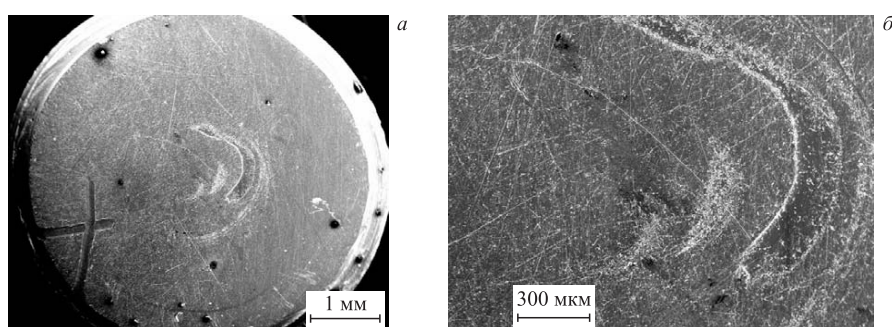


Рис. 30. СЭМ-изображения общего вида ЛС (*a*) и часть поверхности ЛС с большим увеличением

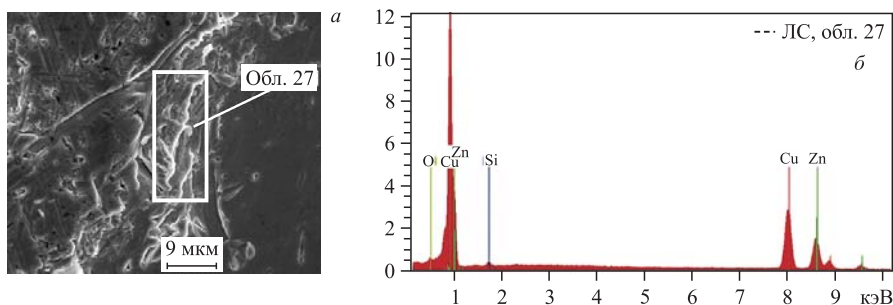


Рис. 31. СЭМ-изображение участка ЛС (*a*) и спектр РМЗА, измеренный в обл. 27 (*б*)

**Таблица 14. Концентрации элементов, измеренные РМЗА в обл. 27 рис. 31, *a***

Элемент	Серия	$C$ , вес. %	$C$ , ат. %
Кислород	К	$3,22 \pm 1,23$	11,73
Кремний	К	$0,58 \pm 0,12$	1,20
Медь	К	$57,38 \pm 3,00$	52,54
Цинк	К	$38,81 \pm 2,11$	34,53

Из табл. 14 видно, что отношение относительных концентраций меди и цинка близко к аналогичному отношению для исходной латуни ( $C_{Cu} : C_{Zn} = 60,34 : 39,66$ ) с примесью кислорода и небольшим содержанием кремния.

На рис. 32, *a* представлена центральная часть ЛС с измененной поверхностью, в обл. 28 которой сделан РМЗА (*б*). В табл. 15 приведен элементный состав.

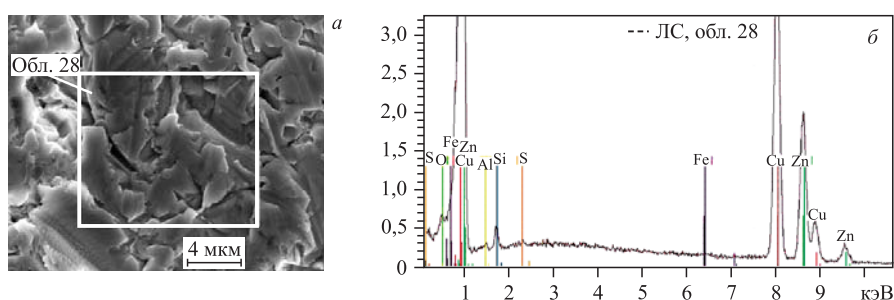


Рис. 32. СЭМ-изображение участка поверхности ЛС (*a*) и спектр РМЗА, проведенного в обл. 28 (*б*)

Таблица 15. Концентрации элементов, измеренные РМЗА в обл. 28 рис. 32, *a*

Элемент	Серия	$C$ , вес. %	$C$ , ат. %
Кислород	К	$3,12 \pm 1,66$	11,32
Алюминий	К	$0,07 \pm 0,10$	0,16
Кремний	К	$0,82 \pm 0,20$	1,70
Сера	К	$0,04 \pm 0,09$	0,08
Железо	К	$0,14 \pm 0,11$	0,15
Медь	К	$58,17 \pm 4,24$	53,17
Цинк	К	$37,63 \pm 2,86$	33,42

Как видно, элементный состав в этой обл. 28 изменился слабо. Помимо меди и цинка с измененным отношением относительных концентраций меди и цинка  $C_{Cu} : C_{Zn} = 61,40 : 38,60$  присутствуют также в малых количествах O, Al, Si, S и Fe.

На рис. 33, *a* показан участок поверхности ЛС с большим увеличением, и сделан РМЗА в темной области, спектр которого показан на рис. 33, *б*. В табл. 16 приведен элементный состав.

Из табл. 16 видно, что на темном участке помимо соотношения относительных концентраций меди и цинка, далекого от исходного соотношения в латуни (так как  $C_{Cu} : C_{Zn} = 63,07 : 36,93$ ), присутствуют в большом количестве кремний (30,49 ат. %) и углерод (33,12 ат. %), а концентрация ки-

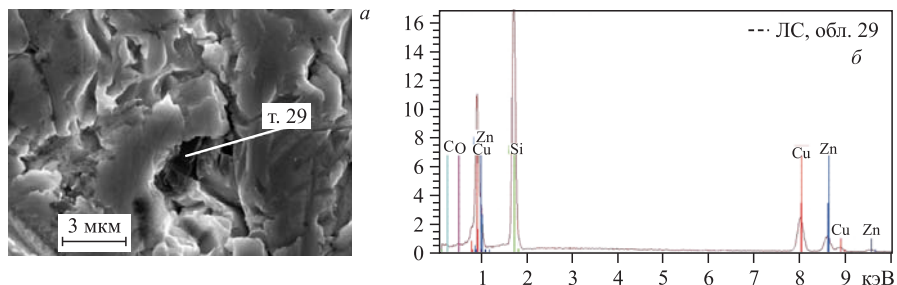


Рис. 33. СЭМ-изображение участка поверхности ЛС (а) и спектр РМЗА, проведенного в темной области в т. 29

Таблица 16. Концентрации элементов, измеренные РМЗА в т. 29 на рис. 33, а

Элемент	Серия	C, вес. %	C, ат. %
Углерод	К	12,16 ± 4,05	33,12
Кислород	К	3,25 ± 1,15	6,64
Кремний	К	26,18 ± 1,90	30,49
Медь	К	36,46 ± 1,73	18,77
Цинк	К	21,96 ± 1,12	10,99

слорода практически не меняется и составляет примерно по 3 вес. %, как в табл. 14 и 15.

Отметим, что поверхности ЛС на рис. 31, а, 32, а, 33, а очень напоминают сглаженные поверхности за счет их переплавки.

Похожие, то есть сглаженные структуры поверхностей ЛС с сильными аномалиями представлены на рис. 34, а и 34, б при увеличениях  $\times 1300 K$  и  $\times 39030 K$  соответственно.

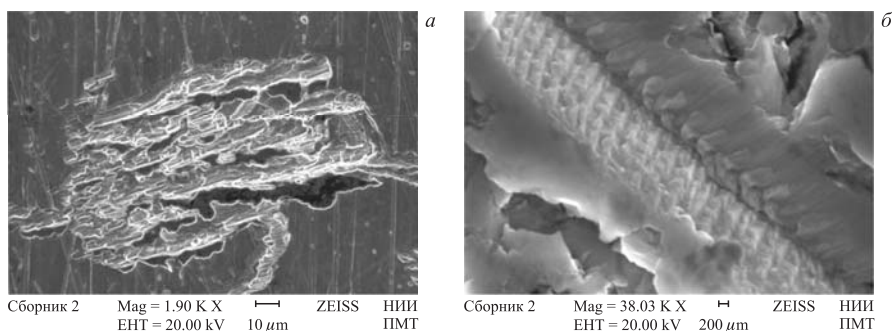


Рис. 34. СЭМ-изображения двух областей ЛС с меньшим  $\times 1,90 K$  (а) и большим  $\times 39,03 K$  (б) увеличениями

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изучено изменение элементного состава и структуры поверхности входного окна из бериллиевой бронзы ВО (поз. 4), боковой и торцевых поверхностей Pd-стержня (поз. 9), марганцевой фольги МФ (поз. 10) и латунного сборника ЛС продуктов реакций (поз. 12) на рис. 1.

Показано, что имеются значительные изменения на поверхности входной диафрагмы входного окна с различными частицами на поверхности (см. рис. 2, 4, 6, 7, 9–11). На внутренней поверхности ВО, имевшей контакт с водородом, обнаружены комплексы мелких частиц (рис. 2, б, 4, 6, а, 9, а, 10 и 11) с элементными составами от углерода до кальция, включая также железо и цинк. Концентрация кальция в некоторых структурах оказывается высокой: 10,18 вес. % (см. рис. 2, б, табл. 1), 25,35 вес. % (см. рис. 4, а, табл. 2) и 37,78 вес. % (см. рис. 6, а, табл. 3). Особо следует отметить обнаружение такого элемента, как летучий элемент фтор —  $(5,34 \pm 1,83)$  вес. %, или 6,59 ат. % (см. рис. 6, табл. 3 и рис. 10, б и 11, б), который может находиться только в химически связанном соединении.

На поверхности ВО обнаружена тонкостенная трубка (см. рис. 7 и спектр РМЗА, измеренный в обл. 42). Как видно из спектра (рис. 8), эта трубка состоит из углерода и кислорода с малыми количествами кремния и алюминия. Отметим, что такие трубки были обнаружены при изучении влияния облучения  $\gamma$ -квантами камеры ННРС без палладиевого стержня (см. [18, 19]).

На боковой поверхности Pd-стержня обнаружены достаточно крупные структуры (см. рис. 14, а, 15, а и 17, а), которые состоят преимущественно из легких элементов от углерода до кальция с присутствием в ряде случаев меди — 2,87 вес. % (рис. 12, б, табл. 4) и цинка — 2,81 вес. % (рис. 17, а, табл. 8). На боковой поверхности Pd-стержня встречаются частицы сложной формы (см. рис. 16, а), в которых высокое содержание кальция — до 9,18 вес. % (см. рис. 16, а, табл. 7). На торцевой поверхности Pd-стержня обнаружена система пятен, которые состоят из цинка и кислорода, типа ZnO (см. рис. 19, рис. 21, а и рис. 22, а и распределения элементов на рис. 22, б). На поверхности торцевой части Pd-стержня имеются места с разрывом поверхности (см. рис. 20).

На поверхности марганцевой фольги обнаружены: тонкостенная трубка (см. рис. 24, а), состоящая из углерода и кислорода, по-видимому, также и из водорода (см. рис. 24, б). Также найдены структуры сложной формы (см. рис. 25, а, 27, а, рис. 28, а и 29, а). В этих структурах присутствует широкий набор химических элементов (см., например, табл. 12), включая азот 5,39 вес. %, или 6,55 ат. %, и олово (0,22 вес. %).

Поверхность латунного сборника претерпела значительные структурные изменения (см. рис. 30 и рис. 31–34). В отдельных областях ЛС обнаружена высокая концентрация кремния — до 26,18 вес. %, или 30,49 ат. %.

Результаты, полученные при изучении крупной синтезированной частицы и структур, обнаруженных на обеих поверхностях, которые имели контакт с водородом, разрезанной пополам латунной втулки, будут представлены в следующей работе.

Следует отметить, что в целом обнаруженные структуры и частицы в данной работе и их элементный состав подтверждают результаты, полученные при исследовании элементов камеры ННРС с давлением водорода 1 кбар при облучении  $\gamma$ -квантами [18, 19].

Необходимо особо отметить, что в предыдущих работах [18, 19] представлены результаты исследований по облучению ННРС  $\gamma$ -квантами при тех же параметрах и времени облучения электронным пучком, что и в данной работе, но при давлении водорода 1 кбар. В этом эксперименте были получены и изучены методами СЭМ и РМЗА две из более чем десяти обнаруженных относительно крупных частиц и целого набора других разнообразных структур, которые покрывали внутренние поверхности камеры ННРС. При этом в камере отсутствовал металлический Pd-стержень. В данной работе Pd-стержень присутствовал, но давление молекулярного водорода составляло 0,5 кбар. При этом были обнаружены одна крупная синтезированная частица и структуры, по элементному составу и внешнему виду (трубки, рыхлые образования и другие относительно крупные частицы) похожие на объекты, обнаруженные в работах [18, 19]. Из этого факта можно сделать вывод, что процессы образования структур из легких элементов от углерода до кальция могут происходить и без металлических образцов. Снижение давления молекулярного водорода в два раза и его количества в камере ННРС в данном эксперименте по сравнению с предыдущим [18, 19] уменьшило как количество образовавшихся объектов, так и их разнообразие (см., например, структуры на основе свинца в работе [19]).

Обсуждение ядерных реакций, которые могли иметь место и привели к обнаруженным аномалиям, проведено в работах [18, 19]. Здесь еще раз приведем важную на наш взгляд цитату из работы [21] (см. также [22]): *«В расчетах звездных моделей часто используется так называемая смесь Рассела тяжелых элементов (Russell-mixture of heavy elements), которая представляет собой простейшее приближение к точным составам-конституциям (constitutions) звезд. Эта смесь Рассела дается в виде: 50%  $^8\text{O}$ , 25%  $^{11}\text{Na}$  и  $^{12}\text{Mg}$ ; 6%  $^{14}\text{Si}$ , 6%  $^{19}\text{K}$  и  $^{20}\text{Ca}$ , 13%  $^{26}\text{Fe}$  — и имеет средний эффективный молекулярный вес  $\mu = 1,85$ .*

Авторы выражают признательность за полезные обсуждения ведущему научному сотруднику ЛЯР им. Г. Н. Флерова ОИЯИ В. А. Щеголеву, за подготовку камеры ННРС к облучению и постоянную помощь ведущему научному сотруднику НЦЯИ доктору Т. Вилчинска-Китовска, за облучение камеры ННРС  $\gamma$ -квантами А. Г. Белову, за СЭМ и РМЗА старшему научному сотруднику аналитического центра Научно-исследовательского института пер-



спективных материалов МИЭМ А. И. Гайдар и научному сотруднику НИИЯФ им. Д. В. Скобельцына МГУ им. М. В. Ломоносова Д. И. Петрову.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Didyk A. Yu., Wisniewski R.* Nuclear Reactions, Induced by Gamma Quanta, in Palladium Saturated with Deuterium Surrounded by Dense Deuterium Gas // *Eur. Phys. Lett. (EPL)*. 2012. V. 99. P. 22001-P1–22001-P6.
2. *Didyk A. Yu., Wisniewski R.* Nuclear Reactions in Deuterium-Saturated Palladium under Irradiation by 10 MeV  $\gamma$ -Quanta, in Dense Molecular Deuterium at 1.2 kbar Pressure // *Eur. Phys. Lett. (EPL)*. 2013. No. 4. P. 42002-P1–42002-P6.
3. *Didyk A. Yu., Wisniewski R.* Chemical Composition and Structural Phase Changes of Novel Synthesized Structure and of Pd Sample under  $\gamma$ -Quanta Irradiation in Dense Deuterium Gas // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2012. V. 9, No. 8. P. 615–631; JINR Preprint E15-2012-34. Dubna, 2012. 26 p.
4. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П.* Синтез новых структур в плотном газообразном дейтерии и насыщенном дейтерием палладии при ядерных реакциях, инициированных  $\gamma$ -квантами // *Физика и химия обработки материалов*. 2012. №5. С. 5–13; Препринт ОИЯИ Р15-2012-50. Дубна, 2012. 16 с.
5. *Didyk A. Yu., Wisniewski R., and Wilczynska-Kitowska T.* Deuteron Disintegration, Thermonuclear and Nuclear Fission Reactions Induced by  $\gamma$ -Quanta in D-Saturated Palladium and Dense Deuterium Gas with Synthesis of New Structures // *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2013. V. 7, No. 2. P. 239–247.
6. *Didyk A. Yu., Wisniewski R.* Synthesis of New Structures in Dense Deuterium Gas and Deuterated Palladium under Nuclear Reactions Induced by  $\gamma$  Quanta // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2013. V. 4, No. 3. P. 5–13.
7. *Didyk A. Yu., Wisniewski R., Wilczynska-Kitowska T.* Changes of Surface Structure and Elemental Composition of Pd Rod and Collector of Nuclear Reaction Products Irradiated with 10-MeV  $\gamma$ -Quanta in Dense Deuterium Gas // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2013. V. 10, No. 7. P. 804–819; JINR Preprint R15-2013-15. Dubna, 2013. 39 p.
8. *Didyk A. Yu., Wisniewski R., Wilczynska-Kitowska T.* Changes of Surface Structure and Elemental Composition of Components of Deuterium High-Pressure Chamber with Pd Rod Inside Irradiated with 10-MeV  $\gamma$ -Quanta in Dense Deuterium Gas // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2013. V. 10, No. 7. P. 820–832; JINR Preprint R15-2013-20. Dubna, 2013. 32 p.
9. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П.* Ядерные реакции в насыщенном дейтерием палладии и рении в атмосфере плотного дейтерия при облучении  $\gamma$ -квантами непрерывного спектра с граничной энергией 23 МэВ // *Письма в ЭЧАЯ*. 2012. №5. С. 5–13; Препринт ОИЯИ Р15-2012-63. Дубна, 2012. 22 с.
10. *Didyk A. Yu., Wisniewski R.* The Study of Changes in the Element Compositions of Pd and Re Specimens Irradiated in Dense Gaseous Deuterium by  $\gamma$ -Quanta with Boundary Energy up to 23 MeV // *J. Phys. Scie. Appl. (JPASA)*. 2013. V. 3(4). P. 209–217.
11. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П.* Изменения поверхности, объемных свойств образцов ванадия и нержавеющей стали, облученных в плотном газообразном дейтерии

- $\gamma$ -квантами с пороговой энергией 23 МэВ. Препринт ОИЯИ Р15-2012-75. Дубна, 2012. 15 с.
12. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* Результаты по облучению алюминия и гомогенного сплава  $\text{YMn}_2$   $\gamma$ -квантами с энергией 23 МэВ в атмосфере молекулярного дейтерия при давлении 2 кбар // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 3(187). С. 284–298; Препринт ОИЯИ Р15-2013-41. Дубна, 2013. 22 с.
  13. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* Результаты по облучению нержавеющей стали и меди  $\gamma$ -квантами с энергией 23 МэВ в атмосфере молекулярного дейтерия при давлении 2 кбар. Препринт ОИЯИ Р15-2013-42. Дубна, 2013. 28 с. Письма в ЭЧАЯ. 2013 (в печати).
  14. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Properties of Hydrogen and Its Isotopes under High Pressure, and Technological Applications. Dubna, JINR, 2013. 320 p.
  15. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Phenomenological Nuclear-Reaction Description in Deuterium-Saturated Palladium and Synthesized Structure in Dense Deuterium Gas under  $\gamma$ -Quanta Irradiation // Part. Nucl., Lett. 2013. V. 10, No. 3(180). P. 437–457; JINR Preprint E15-2012-35. Dubna, 2012. 25 p.
  16. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Changes Observed in the Elemental Composition of Palladium and Rhenium Specimens Irradiated in Dense Deuterium by  $\gamma$ -Quanta with Boundary of Energy 23 MeV // Condensed Matter Nucl. Sci. 2014 (in press).
  17. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* Изменения структуры и элементного состава Рд-стержня и сборника продуктов реакций, облученных 10 МэВ-ными тормозными  $\gamma$ -квантами в молекулярном водороде при давлении 2,5 кбар. Препринт ОИЯИ Р15-2013-80. Дубна, 2013. 32 с.; Письма в ЭЧАЯ. 2014 (в печати).
  18. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* Синтез микрочастиц в молекулярном водороде при давлении 1 кбар при ядерных реакциях под действием тормозных  $\gamma$ -квантов с пороговой энергией 10 МэВ. Химический состав и структуры на внутренних поверхностях компонент камеры высокого давления. Препринт ОИЯИ Р15-2014-2. Дубна, 2014. 42 с.; Письма в ЭЧАЯ. 2014 (в печати).
  19. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* Синтез микрочастиц в молекулярном водороде при давлении 1 кбар при ядерных реакциях под действием тормозных  $\gamma$ -квантов с пороговой энергией 10 МэВ. Химический состав синтезированных частиц и структур на поверхности реакционной камеры. Препринт ОИЯИ Р15-2014-3. Дубна, 2014. 42 с.; Письма в ЭЧАЯ. 2014 (в печати).
  20. *Ишханов Б. С., Капитонов И. М.* Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами. М.: Изд-во МГУ, 1979. 215 с.
  21. *Gamov G.* Nuclear Energy Sources and Stellar Evolution // Phys. Rev. 1938. V. 53. P. 595–604.
  22. *Marshak R. E., Morse P. M., York H.* Equation of State of Hydrogen, Helium, and Russel Mixture at High Temperatures and Pressures // Astrophys. J. 1950. V. 111. P. 214–220.

Получено 30 января 2014 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 18.03.2014.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 2,2. Уч.-изд. л. 2,7. Тираж 225 экз. Заказ № 58214.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)