

P15-2013-15

А. Ю. Дидык*, Р. Вишневецкий^{1, **}, Т. Вилчинска-Китовска¹

ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ
И ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА Pd-СТЕРЖНЯ
И СБОРНИКА ПРОДУКТОВ ЯДЕРНЫХ
И ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ, ОБЛУЧЕННЫХ 10-МэВ
 γ -КВАНТАМИ В ПЛОТНОМ ДЕЙТЕРИИ

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

¹ Национальный центр ядерных исследований, Отвоцк, Польша

* E-mail: didyk@jinr.ru

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

Дидык А. Ю., Вишневецкий Р., Вилчинска-Китовска Т.	P15-2013-15
Изменения структуры поверхности и элементного состава Pd-стержня и сборника продуктов ядерных и химических реакций, облученных 10-МэВ γ -квантами в плотном дейтерии	
<p>Камера высокого давления (ДНРС) была заполнена молекулярным дейтерием при давлении примерно 1,2 кбар. Внутри ДНРС находился насыщенный дейтерием палладиевый стержень. ДНРС была облучена тормозными γ-квантами с энергией 10 МэВ в течение 18 ч на электронном ускорителе МТ-25 при токе пучка электронов 11–13 мкА. После облучения элементный состав поверхностей всех элементов ДНРС, находящихся в плотном дейтерии, был изучен с использованием сканирующей электронной микроскопии и рентгеновского микроэлементного зондового анализа.</p>	
<p>Установлено, что все поверхности, включая и поверхность особо чистого Pd-стержня (99,995%), оказались покрыты более или менее однородным слоем свинца и крупными его микрочастицами. Помимо этого обнаружены наряду с легкими ${}^6\text{C}$, ${}^8\text{O}$, ${}^{11}\text{Na}$, ${}^{12}\text{Mg}$, ${}^{13}\text{Al}$, ${}^{14}\text{Si}$, ${}^{22}\text{Ti}$, ${}^{25}\text{Mn}$, ${}^{26}\text{Fe}$, ${}^{29}\text{Cu}$, ${}^{30}\text{Zn}$ такие тяжелые металлы, как ${}^{47}\text{Ag}$, ${}^{73}\text{Ta}$, ${}^{74}\text{W}$, ${}^{78}\text{Pt}$, ${}^{79}\text{Au}$ и ${}^{82}\text{Pb}$. Обсуждаются процессы, способные привести к обнаруженным аномалиям во вновь образовавшихся химических элементах.</p>	
<p>Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ. Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2013</p>	

Didyk A.Yu., Wiśniewski R., Wilczynska-Kitowska T.	P15-2013-15
Changes of Surface Structure and Elemental Composition of Pd Rod and Collector of Nuclear and Chemical Reaction Products, Irradiated with 10-MeV γ Quanta in Dense Deuterium Gas	
<p>A high-pressure chamber was filled with 1.2 kbar molecular deuterium (DHPC). The palladium rod saturated by deuterium was loaded inside the DHPC and irradiated with 10-MeV bremsstrahlung γ quanta during 18 h at 11–13 μA electron beam using the MT-25 electron accelerator. The elemental compositions of all DHPC element surfaces which were inside dense deuterium gas were studied using scanning electronic microscopes with X-ray microprobe analysis. It was established that all surfaces including the surface of a high-purity palladium rod (99.995%) were covered by partly homogeneous layer or large microparticles of lead. Also, such light elements as ${}^6\text{C}$, ${}^8\text{O}$, ${}^{11}\text{Na}$, ${}^{12}\text{Mg}$, ${}^{13}\text{Al}$, ${}^{14}\text{Si}$, ${}^{22}\text{Ti}$, ${}^{25}\text{Mn}$, ${}^{26}\text{Fe}$, ${}^{29}\text{Cu}$, ${}^{30}\text{Zn}$ and heavy metals as ${}^{47}\text{Ag}$, ${}^{73}\text{Ta}$, ${}^{74}\text{W}$, ${}^{78}\text{Pt}$, ${}^{79}\text{Au}$ and ${}^{82}\text{Pb}$ were observed. The possible processes which can cause the observed anomalies in the composition of new created chemical elements are discussed shortly.</p>	
<p>The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.</p>	
<p>Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2013</p>	

ВВЕДЕНИЕ

В серии предыдущих статей были представлены результаты по изменению химического состава поверхностей компонентов, входящих в камеру высокого давления дейтерия (ДНРС) с Pd-стержнем внутри (см. рис. 1 в [1–4]), при давлении дейтерия около 3 кбар с образованием радиационно-синтезированной структуры из химических элементов (${}^6\text{C}$, ${}^8\text{O}$, ${}^{13}\text{Al}$, ${}^{14}\text{Si}$, ${}^{22}\text{Ti}$, ${}^{29}\text{Cu}$, ${}^{30}\text{Zn}$), образовавшихся в результате ядерных реакций, инициированных γ -квантами с энергией ~ 9 МэВ, в насыщенном дейтерием палладиевом стержне [1, 3, 4]. На основе обнаруженных изменений концентраций химических элементов была предложена феноменологическая модель ядерных реакций типа реакции Оппенгеймера [5] и им сопутствующих в капельной модели ядра при изменении вращательного момента [6–10].

Последующие исследования с тремя модифицированными камерами ДНРС [7] при давлении дейтерия ~ 2 кбар, в первую из которых были помещены стержни из Pd (один) и Re (три) [7], во вторую — V-стержень и стержень из нержавеющей стали [11], а в третью — целый набор стержней из Al (два), Cu (один), два образца из YMn_2 и никелевая проволока, были проведены под действием γ -квантов с энергией 23 МэВ, т. е. в диапазоне энергий γ -квантов, характерных для гигантского дипольного резонанса [4, 11] (см. также [12–14]).

Данная работа является развитием и продолжением эксперимента в [1, 3, 4] с целью выяснения зависимостей эффектов от величины давления дейтерия в ДНРС, влияния интенсивности потока γ -квантов и набранного флюенса γ -квантов.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В камеру ДНРС, как и в работах [1, 3, 4], был помещен Pd-стержень длиной 4 мм и диаметром 3,8 мм. Образец палладия имел высокую чистоту: $\sim 99,995\%$. Это значение было выбрано как наихудшее из 8 проведенных независимых измерений. При этом максимальные концентрации примесей

(в ppm) следующие: Ag (< 3); Al (15); As (< 10); Au (48); Ba (0); Be (0); Bi (< 5); Ca (< 3); Cu (12); Fe (19); Ga (0); In (0); Ir (< 10); Mg (4); Mn (< 5); Ni (< 5); Pb (< 5); Pt (< 10); Rh (< 10); Ru (< 10); Sb (< 10); Si (< 10); Sn (< 10); Zn (< 3).

Давление молекулярного дейтерия в ДНПС при облучении γ -квантами составляло $P_{D_2} \cong 1,2$ кбар, что соответствует расчетному значению концентрации молекулярного газообразного дейтерия $N_{D_2} \cong 1,476 \cdot 10^{22}$ мол. D_2/cm^3 при его плотности $\rho_{D_2} \cong 0,088$ г/см³ ([1, 3, 6]). ДНПС была облучена тормозными γ -квантами с энергией 10 МэВ, полученными при прохождении пучка электронов на ускорителе МТ-25, через 3-мм W -тормозную фольгу и алюминиевый поглотитель толщиной 25 мм. Длительность облучения γ -квантами ДНПС составила 18 ч при токе электронного пучка 11–13 мкА с диаметром пучка электронов на входе в W -тормозную фольгу примерно 6–8 мм.

Расчетная плотность потока γ -квантов на 1 мкА тока электронного пучка составляла $Y \approx 7,5 \cdot 10^{12}$ МэВ⁻¹·ср⁻¹/1 мкА. При этом потоке γ -квантов на 1 мкА выход нейтронов и протонов из реакции фоторасщепления дейтронов $d(\gamma, n)p$ под действием γ -квантов составлял $Y_{n,p} \approx 0,8 \cdot 10^6$ $n, p/1$ мкА (см. расчеты в [1, 3, 4, 6]).

Как и в первом эксперименте [1, 3, 4], после вскрытия ДНПС Pd-стержень (см. [3], рис. 1, поз. 9) оказался зажатым внутренней латунной втулкой диаметром 4 мм (см. [3], рис. 1, поз. 8). Извлечь Pd-стержень удалось только через два месяца после уменьшения его диаметра за счет процессов десорбции дейтерия. Исследование боковой поверхности Pd-стержня выявило, что примерно 40 % приближенной к латунному сборнику части Pd-стержня приобрело цилиндрическую форму и несколько изменило цвет. На левой части были обнаружены характерные царапины, присущие исходному образцу Pd-стержня.

На рис. 1, *a* и *b* представлены изображения, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), поверхности Pd-стержня до его извлечения из латунной втулки и увеличенное изображение центральной деформированной части, в месте входа γ -квантов. На рис. 1, *a* можно выделить две области: слева сверху и справа внизу, которые сильно изменились после облучения γ -квантами. Отметим, что центральная сильно деструктурированная часть Pd-стержня на рис. 1, *b* имеет диаметр $\sim 693,2$ мкм, близкий по значению к диаметру сильно деструктурированной части входного окна из бериллиевой бронзы: ~ 660 мкм [15].

На рис. 1, *в* хорошо видна глубокая трещина на поверхности палладия длиной примерно 100 мкм и шириной 25 мкм; такие трещины часто образуются на поверхности облученного γ -квантами палладия, и вблизи них наблюдаются значительные образования ранее отсутствовавших легких и тяжелых элементов (см. также [1, 3, 6]). Возникновение трещин обусловлено высокой температурой, по-видимому, за счет ядерных реакций.

На рис. 1, *a* видно, что между внутренней стенкой латунной втулки и внешней боковой поверхностью Pd-стержня имеется зазор, а обратная сторона Pd-стержня плотно прижата к внутренней стенке латунной втулки.

В связи с необычностью изменений химического состава в компонентах ДНРС и большим объемом полученных результатов в данном исследовании, в работе дополнительно изучена структура поверхностей и проведен рентгеновский микроэлементный зондовый анализ (РМЗА) химического состава Pd-стержня (см. [3], рис. 1, поз. 9) и латунного сборника (см. [3], рис. 1, поз. 12), а в [15] представлены детальные исследования всех поверхностей внутри камеры ДНРС и их элементный состав, а именно: входного окна из бериллиевой бронзы, включая резьбу на ней (см. [3], рис. 1, поз. 4), обеих сторон разделительной марганциновой фольги (см. [3], рис. 1, поз. 10), а затем обеих внутренних поверхностей разрезанной пополам латунной втулки с резьбой на обоих ее концах (см. [3], рис. 1, поз. 8), а также резьбовая структура боковой поверхности латунного сборника (см. [3], рис. 1, поз. 12).

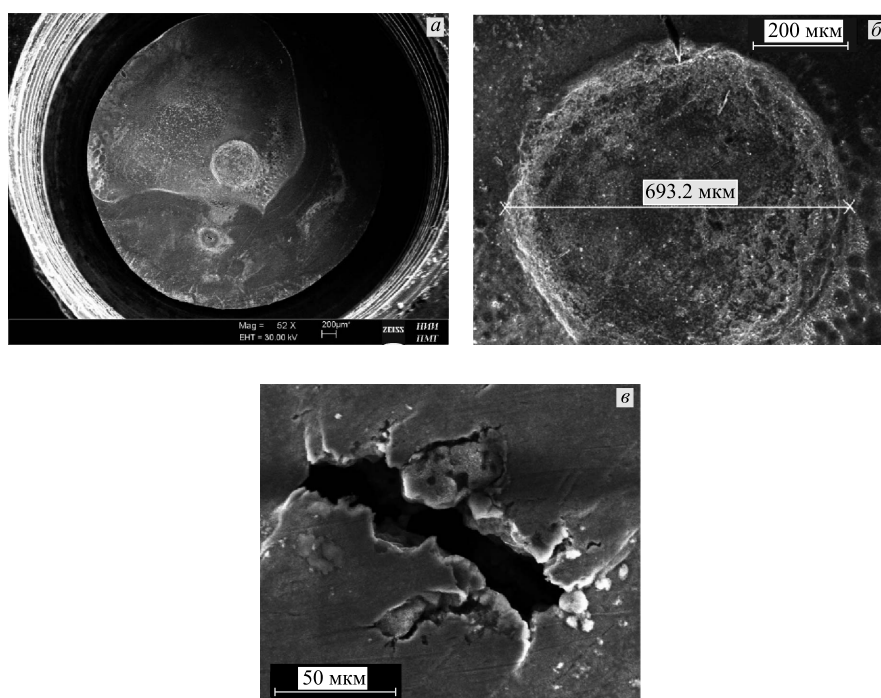


Рис. 1. СЭМ-изображения торцевой части Pd-стержня внутри латунной втулки (*a*), его центральной деформированной части, в месте входа γ -квантов (*b*), глубокой трещины на поверхности палладия (*c*)

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ И РЕНТГЕНОВСКОГО МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО ЗОНДОВОГО АНАЛИЗА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА Pd-СТЕРЖНЯ

РМЗА торца Pd-стержня (см. [3], рис. 1, поз. 9), ближнего к входной диафрагме (см. [3], рис. 1, поз. 4). На рис. 2, *a* представлено СЭМ-изображение боковой поверхности Pd-стержня с выделением двух областей, в которых был проведен РЗМА, а на рис. 2, *б* — изображение другого участка поверхности Pd-стержня с измерением характеристического спектра рентгеновского излучения (ХСРИ) одной из светлых частиц (т. 3). В табл. 1 представлены распределения химических элементов в отмеченных на рис. 2, *a* областях (обл. 1 и обл. 2) и в светлой частице (т. 3) (рис. 2, *б*). Отметим, что в отра-

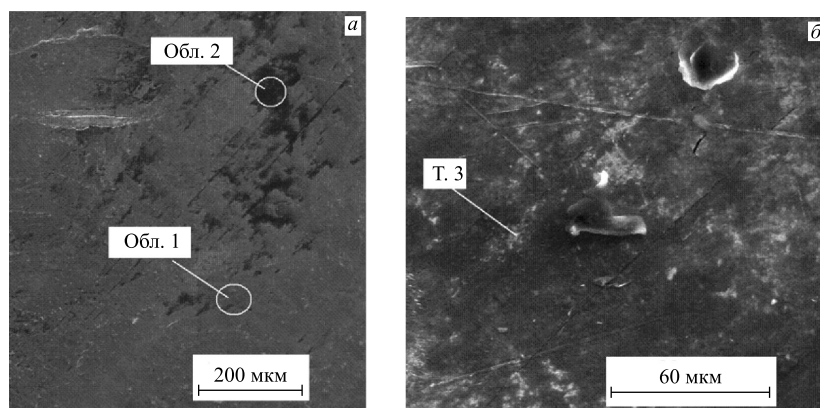


Рис. 2. СЭМ-изображения двух участков поверхности торца Pd-стержня, в которых был проведен РМЗА

Таблица 1. Распределение химических элементов в выделенных областях торцевой поверхности Pd-стержня на рис. 2, *a, б*

Элемент	Z	Серия	C, вес. %	C, ат. %	ΔC , вес. %
Обл. 1					
Палладий	46	L	100	100	2,61
Обл. 2					
Палладий	46	L	79,21	38,49	2,15
Цинк	30	K	2,33	1,85	0,15
Кислород	8	K	18,46	59,66	3,07
Т. 3					
Палладий	46	L	97,29	98,59	2,72
Свинец	82	L	2,71	1,41	0,24

женных электронах при СЭМ-анализе более светлые участки соответствуют химическим элементам с большими порядковыми номерами (зарядами ядер).

Из табл. 1 видно, что на торцевой поверхности Pd-стержня исходное высокое содержание этого элемента сохранилось (см. обл. 1). На более темных участках поверхности произошло существенное изменение элементного состава (см. обл. 2). Измерения *однозначно* показали, что в светлых точках на поверхности (см. т. 3) найдено значительное количество свинца (^{82}Pb). При этом в исходном тщательно промеренном палладии содержание свинца менее чем 5 ppm (т. е. $< 5 \cdot 10^{-6}$ г/г).

На рис. 3 представлены изображения двух других участков торцевой части поверхности Pd-стержня, а в табл. 2 — распределение химических элементов в них.

Отметим, что, как и в ранее полученных результатах при изучении Pd-стержня, в образце присутствуют цинк, медь, титан, кремний и алюминий. При этом обнаружено, что в т. 5 (рис. 3, б) концентрация алюминия весьма высокая (55,09 вес. % и 43,03 ат. %) с одновременным присутствием титана (1,63 вес. % и 0,72 ат. %). Как и в работах [1, 3, 4], титан ранее был обнаружен в больших количествах в синтезированной при облучении структуре. Следует отметить, что в обл. 6 (рис. 3, б), выявлено, как и выше (см. табл. 1, рис. 2, б, т. 3), значительное количество свинца (5,38 вес. % и 1,11 ат. %).

На рис. 4, а, б представлены СЭМ-изображения двух выбросов из объема Pd-стержня по радиусу, в сторону стенки латунной втулки (см. [3], рис. 1, поз. 8), значительных размеров в виде пластинчатых «гребней» длиной более 30 мкм и высотой около 5 мкм с указанием точки (т. 7) и области (обл. 8), в которых выполнен РМЗА. *Важно отметить, что эти СЭМ-исследования были проведены в двух институтах на двух различных микроскопах.* В табл. 3 и 4 представлены распределения химических элементов в отмеченных т. 7 и обл. 8.

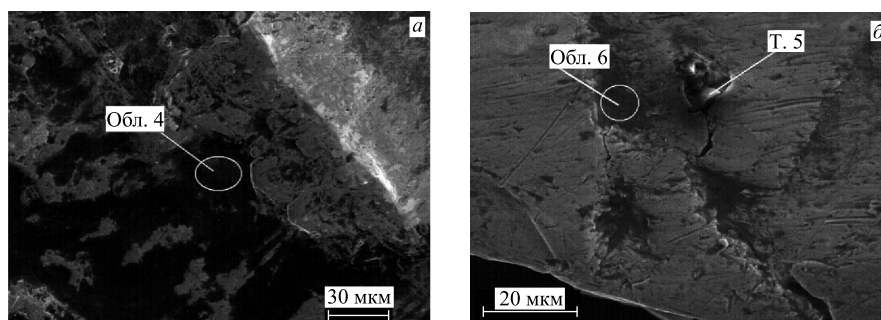


Рис. 3. СЭМ-изображения поверхности участка ближе к центру (а) и краю (б) торца Pd-стержня с указанием областей и точки, в которых был проведен РМЗА

Таблица 2. Распределение химических элементов в обл. 4 (рис. 3, а) и т. 5, обл. 6 (рис. 3, б) на торцевой поверхности Pd-стержня

Элемент	Z	Серия	C, вес. %	C, ат. %	ΔC , вес. %
Обл. 4					
Палладий	46	L	72,77	30,36	1,93
Цинк	30	K	1,29	0,88	0,09
Медь	29	K	3,58	2,50	0,14
Кислород	8	K	17,76	49,29	2,33
Углерод	6	K	4,59	16,97	0,68
Т. 5					
Палладий	46	L	4,78	0,95	0,16
Титан	22	K	1,63	0,72	0,07
Алюминий	13	K	55,09	43,03	2,13
Кислород	8	K	27,95	36,81	3,12
Углерод	6	K	10,54	18,50	1,81
Обл. 6					
Свинец	82	L	5,38	1,11	0,30
Палладий	46	L	63,11	25,40	1,89
Цинк	30	K	1,67	1,09	0,10
Марганец	25	K	0,98	0,76	0,07
Кремний	14	K	0,39	0,59	0,05
Алюминий	13	K	4,76	7,55	0,25
Кислород	8	K	23,71	63,49	3,25

Как видно из табл. 3, в этом застывшем выбросе присутствуют, как и ранее [1, 3, 4], преимущественно легкие химические элементы, такие как углерод (69,80 ат. %), кислород (24,30 ат. %) и алюминий (2,24 ат. %). Обнаружен и свинец (1,09 вес. %).

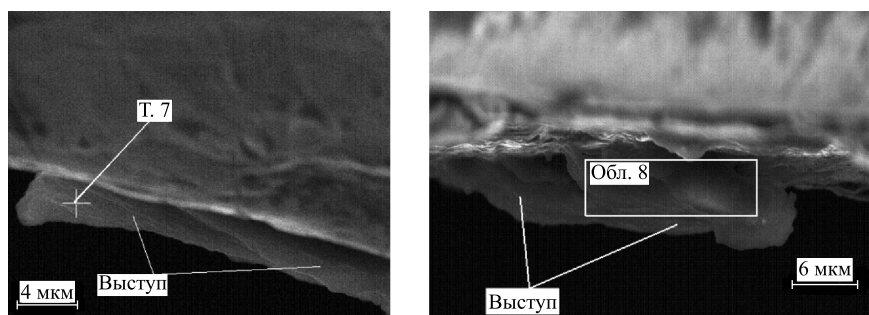


Рис. 4. СЭМ-изображения выбросов из объема Pd-стержня по радиусу, в сторону стенки латунной втулки, с указанием точки (а) и области (б), в которых был проведен РМЗА

Таблица 3. Распределение химических элементов в застывшем выбросе (рис. 4, а, т. 7) с торцевой поверхности Pd-стержня

Элемент	Z	Серия	C, вес. %	C, ат. %	ΔC , вес. %
Свинец	82	L	1,09	0,09	0,15
Палладий	46	L	20,29	3,16	0,69
Медь	29	K	0,24	0,06	0,05
Титан	22	K	0,20	0,07	0,04
Кремний	14	K	0,32	0,19	0,04
Алюминий	13	K	3,64	2,24	0,21
Магний	12	K	0,02	0,02	0,00
Натрий	11	K	0,11	0,08	0,04
Кислород	8	K	23,47	24,30	3,47
Углерод	6	K	50,60	69,80	6,24

Таблица 4. Распределение химических элементов в застывшем выбросе (рис. 4, б, обл. 8) с торцевой поверхности Pd-стержня

Элемент	ат. %	Элемент	ат. %	Элемент	ат. %
^8O	42,45	^{16}S	1,10	^{29}Cu	0,35
^{11}Na	2,61	^{17}Cl	2,35	^{30}Zn	0,29
^{12}Mg	0,51	^{19}K	1,51	^{46}Pd	3,54
^{13}Al	43,32	^{20}Ca	0,93		
^{14}Si	0,88	^{26}Fe	0,18		

Из табл. 4 видно, что в выбросе присутствуют элементы от ^8O до ^{30}Zn при относительно малой концентрации основного элемента ^{46}Pd (только 3,54 ат. %), полученные с участка, площадь которого равна $15,6 \times 5,3$ мкм. В то же время имеется значительное количество ^{13}Al (43,32 ат. %). Здесь следует отметить: толщина выступов может быть такой, что электронный пучок может проходить насквозь, возбуждая частично и подложку из алюминия. Но в данном случае этого не было.

Исследование структуры боковой поверхности Pd-стержня и РМЗА элементного состава. На рис. 5 представлено СЭМ-изображение участка боковой поверхности Pd-стержня с выделенной областью размером $\sim 790 \times 480$ мкм, а в табл. 5 приведено распределение химических элементов в ней. Из анализа ХСРИ* можно сделать вывод, что все линии спектра, соответствующие свинцу (^{82}Pb), присутствуют.

На рис. 6 представлено СЭМ-изображение, сделанное в отраженных электронах вдоль трещины на боковой поверхности Pd-стержня, со светлыми

*В большинстве случаев ХСРИ не представлены. Они приводятся только тогда, когда важно показать наличие основных линий тяжелых элементов.

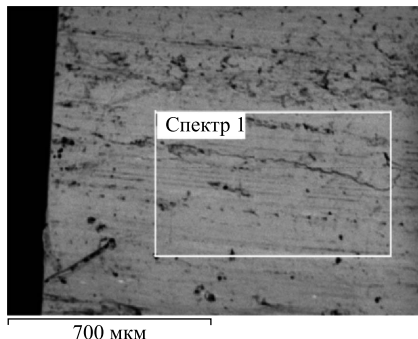


Рис. 5. СЭМ-изображение участка боковой поверхности Pd-стержня с выделенной областью, в которой был проведен РМЗА

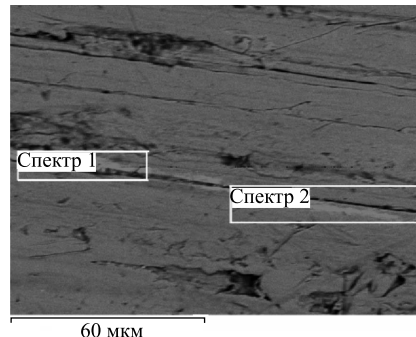


Рис. 6. СЭМ-изображение участка боковой поверхности Pd-стержня вдоль трещины на поверхности со светлыми участками, на которых проведен РМЗА

Таблица 5. Распределение химических элементов в указанной на рис.5 области (790 × 480 мкм) (в вес. %)

Элемент	${}^8\text{O}$	${}^{12}\text{Mg}$	${}^{13}\text{Al}$	${}^{26}\text{Fe}$	${}^{46}\text{Pd}$	${}^{82}\text{Pb}$
Спектр 1	7,88	0,30	0,54	0,30	88,41	2,56

участками, соответствующими тяжелым элементам, на которых был проведен РМЗА. В табл.6 приведены распределения химических элементов в указанных на рис.6 областях размерами 40 × 9,7 и 58 × 11,5 мкм.

Из приведенных данных видно, что на отмеченных участках вдоль протяженной трещины в спектрах 1 и 2 (см. табл. 6, рис. 6) присутствуют характерные рентгеновские линии таких элементов, как платина (${}^{78}\text{Pt}$) и свинец (${}^{82}\text{Pb}$), что свидетельствует об их наличии на отмеченных поверхностях.

В СЭМ-исследованиях при регистрации отраженных электронов участки поверхности, где обнаружены элементы с большими атомными номерами, имеют более светлый оттенок, как отчетливо видно на рис. 7, а, там же приведены ХСРИ (рис. 7, б, в) с участка размером ≈ 14,3 × 7,1 мкм (спектр 2) и в точке (спектр 1) соответственно.

В табл. 7 представлены распределения химических элементов в спектрах 1 и 2 (см. рис. 7, а).

Таблица 6. Распределение химических элементов в двух областях, обозначенных на рис. 6 (в вес. %)

Спектр	Элемент					
	${}^8\text{O}$	${}^{13}\text{Al}$	${}^{29}\text{Cu}$	${}^{46}\text{Pd}$	${}^{78}\text{Pt}$	${}^{82}\text{Pb}$
1	7,16	0,84	0,36	81,53	8,76	1,35
2	4,45	0,50	—	87,44	6,25	1,36

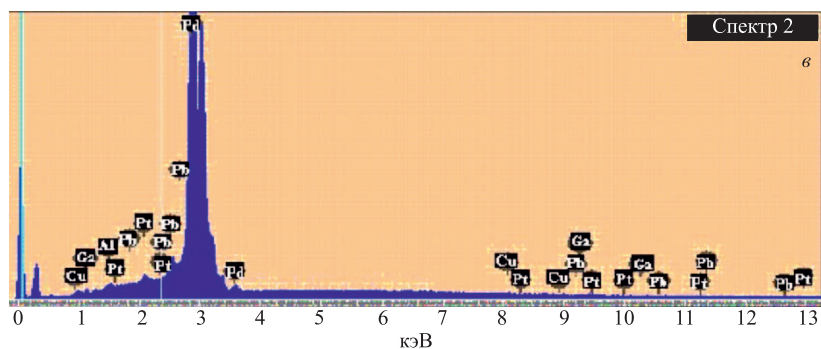
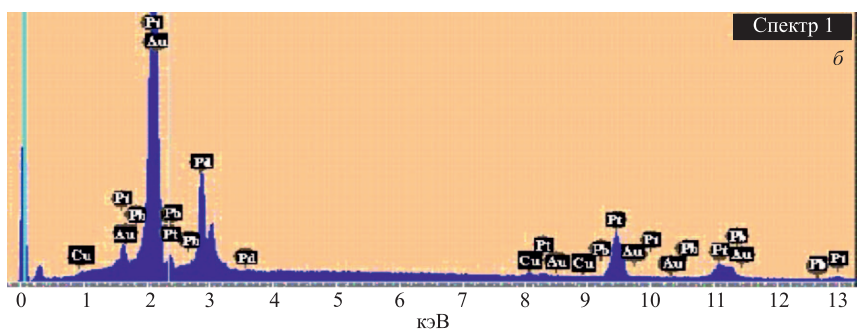
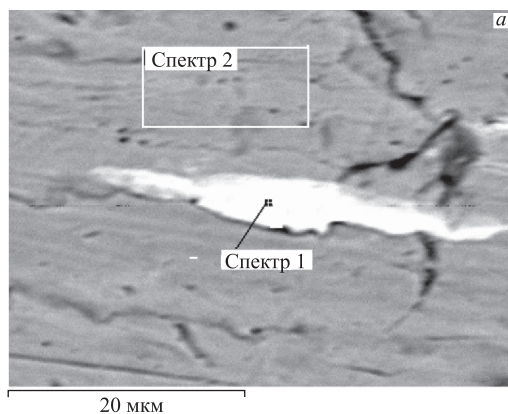


Рис. 7. СЭМ-изображение участка боковой поверхности Pd-стержня размером $14,3 \times 7,1$ мкм и отдельно взятой точки (а), в которых был проведен РМЗА, и соответствующие ХСРИ (б, в)

Особо следует отметить, что в промеренной области (спектр 1) в районе протяженной трещины на поверхности отчетливо виден растекшийся и застывший участок, в котором присутствуют тяжелые элементы, такие как

Таблица 7. Распределение химических элементов в спектрах 1 и 2 на рис. 7, а (в вес. %)

Спектр	Элемент						
	¹³ Al	²⁹ Cu	³¹ Ga	⁴⁶ Pd	⁷⁸ Pt	⁷⁹ Au	⁸² Pb
1	—	0,95	—	28,85	66,64	1,97	1,59
2	0,37	0,81	0,11	96,74	1,29	—	0,68

⁷⁸Pt (66,64 вес. %), ⁷⁹Au (1,97 вес. %) и ⁸²Pb (1,59 вес. %)! Более светлая область имеет протяженность длиной ~ 35,9 мкм и шириной, максимальной по ширине части, ~ 4,8 мкм.

Такие же светлые участки встречаются вблизи развившихся трещин и других, вновь созданных облучением дефектов на боковой поверхности Pd-стержня.

Это свидетельствует о том, что в местах со значительными изменениями структуры поверхности палладия, насыщенного дейтерием, во время облучения γ -квантами происходит локальное изменение элементного состава. Причиной такого изменения могут быть только ядерные реакции. Их инициаторами являются нейтроны и протоны, возникающие при фоторасщеплении дейтерия ($\gamma + d > n + p$), и реакция Оппенгеймера [5]. В свою очередь, эти частицы, бомбардируя ядра палладия ⁴⁶Pd, вызывают их асимметричное деление на два осколка [8–10]. Известна работа, в которой наблюдалось деление ⁴⁴Ru на осколки. Этим можно объяснить появление легких ядер, таких как ⁶C, ⁸O, ¹¹Na, ¹²Mg, ¹³Al и др., включая и летучие изотопы, а также более тяжелых: ²⁴Cr, ²⁵Mn, ²⁶Fe, ²⁹Cu, ³⁰Zn, ³¹Ga. Вызывают удивление два обстоятельства: аномально большой выход этих элементов и локальный характер их появления. Еще более удивительно появление тяжелых элементов ⁷⁸Pt, ⁷⁹Au, ⁸²Pb. В обсуждении результатов и выводах предлагается гипотетическое объяснение этого явления.

РМЗА дальнего от входной диафрагмы торца Pd-стержня. Приведем результаты по исследованию элементного состава и структуры поверхности противоположного торца Pd-стержня, удаленного от места входа γ -квантов. На рис. 8 представлены СЭМ-изображения двух участков поверхности правого торца Pd-стержня размерами 82,9 × 92,7 мкм (спектр 1) и 68,3 × 70,7 мкм (спектр 2) (рис. а) и трех точек (рис. б), в которых был сделан РМЗА.

В табл. 8 и 9 приведены концентрации химических элементов, измеренные с помощью РМЗА, на выделенных участках и точках на рис. 8, а и б.

На рис. 9, а, б представлены СЭМ-изображения двух участков поверхности правого торца Pd-стержня. На рис. 9, а выделены три области: 143 × 138 мкм (спектр 1), 194 × 198 мкм (спектр 2) и 120 × 106 мкм (спектр 3), в которых проведен РМЗА. На рис. 9, б приведена весьма своеобразная структура «пятнистого» типа с выделением двух областей — 17,1 × 19,6 мкм

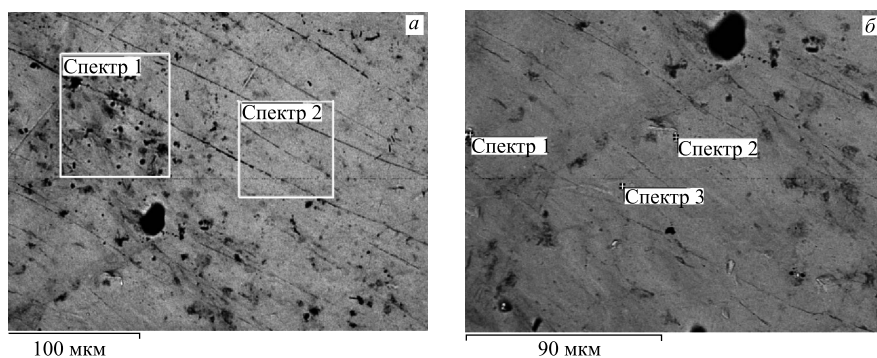


Рис. 8. СЭМ-изображения участков поверхности правого торца Pd-стержня с выделением двух областей (а) и трех точек (б), где сделан РМЗА

Таблица 8. Элементный состав, полученный в двух областях на рис. 8, а (в ат. %)

Спектр	Элемент					
	⁶ C	⁸ O	¹³ Al	¹⁴ Si	³⁰ Zn	⁴⁶ Pd
1	4,39	48,14	0,96	0,93	0,79	44,78
2	1,11	22,63	1,54	—	—	74,72

Таблица 9. Элементный состав, полученный в выделенных точках на рис. 8, б (в вес. %)

Спектр	Элемент					
	⁸ O	¹³ Al	¹⁴ Si	³⁰ Zn	⁴⁶ Pd	⁸² Pb
1	16,07	0,66	—	1,48	43,22	38,57
2	—	0,50	0,32	—	99,18	—
3	—	0,36	0,21	—	99,42	—

(спектр 1) и $13,5 \times 16,5$ мкм (спектр 3) — и двух точек (спектры 2 и 4), в которых был сделан РМЗА. В табл. 10 и 11 приведены концентрации химических элементов в выделенных областях и точках на рис. 9, а, б.

В данном случае две области на рис. 9, б выглядят темными (спектры 1 и 2) из-за наличия в них значительных концентраций меди (29,48 ат. %) и цинка (18,29 ат. %), несмотря на присутствие более тяжелого элемента, чем палладий (⁴⁶Pd), — свинца (⁸²Pb).

При проведении исследований структуры поверхности всех компонентов, входивших в ДНРС, авторы стремились проанализировать все найденные объекты в виде протяженных полос (рис. 10). Элементный состав данных областей приведен в табл. 12.

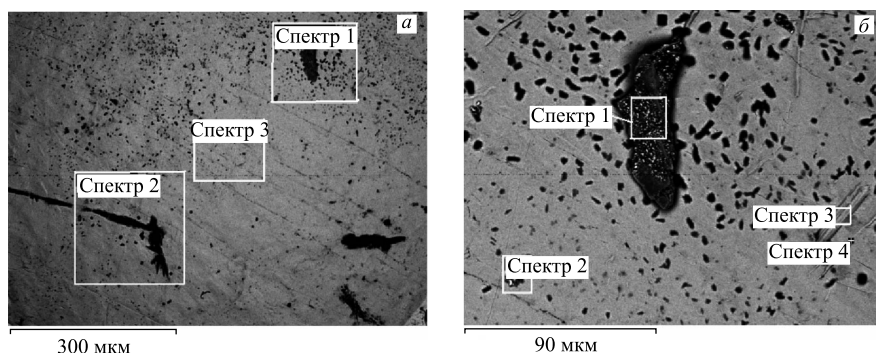


Рис. 9. СЭМ-изображения двух участков поверхности правого торца Pd-стержня в которых был сделан РМЗА

Таблица 10. Концентрации элементов в трех выделенных областях рис. 9, а (в ат. %)

Спектр	Элемент					
	⁸ O	¹³ Al	¹⁴ Si	²⁹ Cu	³⁰ Zn	⁴⁶ Pd
1	51,28	0,56	0,50	2,42	0,30	44,93
2	49,33	0,79	0,57	—	—	49,31
3	28,51	0,94	0,79	—	—	69,76

Таблица 11. Концентрации элементов в двух выделенных областях и двух точках на рис. 9, б (в ат. %)

Спектр	Элемент							
	⁸ O	¹³ Al	¹⁴ Si	²⁶ Fe	²⁹ Cu	³⁰ Zn	⁴⁶ Pd	⁸² Pb
1	43,39	0,82	—	0,38	29,48	18,29	3,16	4,48
2	46,97	0,84	0,48	—	—	2,80	48,25	0,66
3	33,93	1,18	0,80	—	—	—	64,09	—
4	—	1,31	0,77	—	—	—	97,92	—

Таблица 12. Концентрации элементов в выделенных областях и точке на рис. 10 (ат. %)

Спектр	Элемент			
	⁸ O	¹³ Al	¹⁴ Si	⁴⁶ Pd
1	—	1,18	0,93	97,89
2	—	0,88	0,61	98,51
3	36,44	1,09	1,43	61,04

На рис. 11, а представлено СЭМ-изображение участка темного цвета, показанного на рис. 9, б, этот же участок при большем увеличении см. на рис. 11, б. РМЗА был проведен в двух точках, результаты которого представлены в табл. 13.

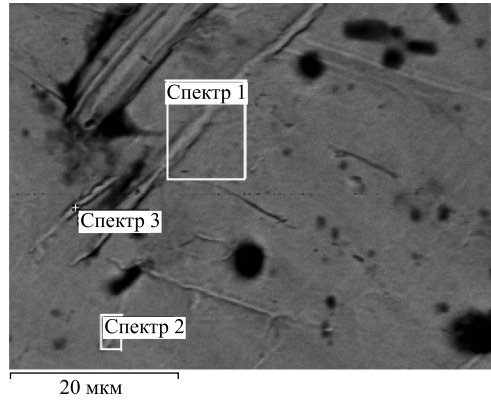


Рис. 10. СЭМ-изображение участка поверхности правого торца Pd-стержня; в выделенных областях и точке проведен РМЗА

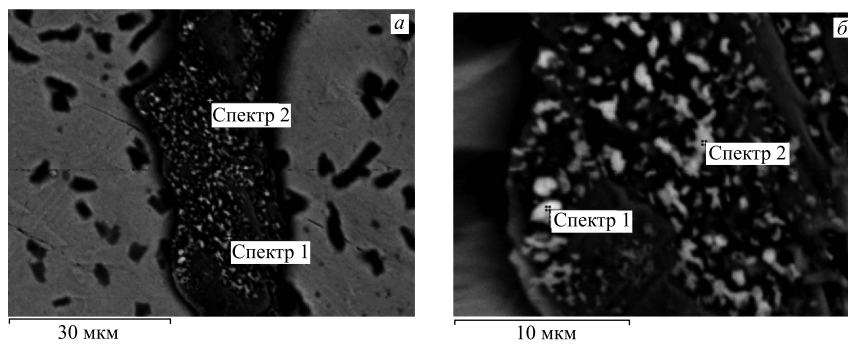


Рис. 11. СЭМ-изображения участка поверхности правого торца Pd-стержня с выделением двух точек, в которых был сделан РМЗА, с разными увеличениями

Таблица 13. Концентрации элементов в выделенных точках на рис. 11, а (в ат. %)

Спектр	Элемент							
	$_{8}\text{O}$	$_{13}\text{Al}$	$_{17}\text{Cl}$	$_{26}\text{Fe}$	$_{29}\text{Cu}$	$_{30}\text{Zn}$	$_{46}\text{Pd}$	$_{82}\text{Pb}$
1	60,82	0,77	—	—	14,99	9,17	2,28	11,96
2	32,52	—	0,54	0,44	35,28	25,81	3,22	2,20

Из табл. 13 видно, что в т. 2 (спектр 2) присутствует значительное количество меди (35,28 ат. %) и цинка (25,81 ат. %). Помимо этих элементов в т. 1 (спектр 1) обнаружено до 11,96 ат. % свинца.

Поэтому в данном случае РМЗА был проведен с целью более точной оценки концентрации свинца в отдельно взятых светлых точках (спектры 1 и 2), которые отчетливо видны на рис. 11, б. Результаты анализа представлены в табл. 14.

Таблица 14. Концентрации элементов в отдельно взятых светлых точках рис. 11, б (в вес. %)

Спектр	Элемент						
	⁸ O	¹³ Al	²⁶ Fe	²⁹ Cu	³⁰ Zn	⁴⁶ Pd	⁸² Pb
1	21,59	0,46	0,37	10,63	5,58	13,00	48,36
2	18,57	0,32	—	19,57	12,22	3,78	45,55

Как видно из табл. 14, в этих новообразованиях присутствует свинец в больших количествах (48,36 и 45,55 вес. %), а также значительное количество меди (10,63 и 19,57 вес. %) и цинка (5,58 и 12,22 вес. %), концентрации основного элемента — палладия — относительно низкие (13,00 и 3,78 вес. %). Наличие кислорода (21,59 и 18,57 вес. %) позволяет предположить, что свинец присутствует в виде оксида.

На рис. 12, а представлены СЭМ-изображения участка поверхности вблизи края торца Pd-стержня (темные части изображения справа) с РМЗА в трех областях: светлого цвета (спектр 1), темного (спектр 2) и «переходного» (спектр 3). Результаты РМЗА представлены в табл. 15.

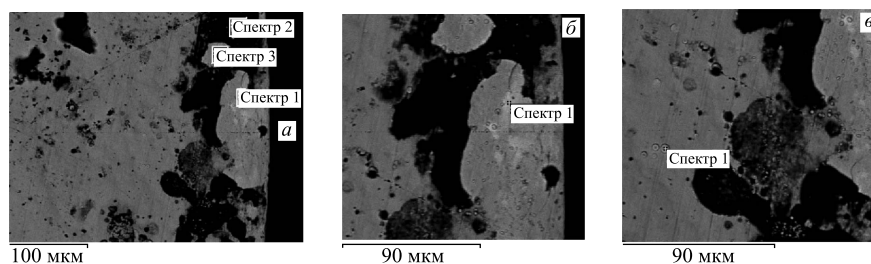


Рис. 12. СЭМ-изображения участка поверхности вблизи края торца Pd-стержня (темные части изображения справа (а, б) с РМЗА в трех областях; то же при большем увеличении (в))

Как видно из таблицы, на светлом участке присутствуют в достаточно больших количествах палладий (71,37 вес. %) и свинец (14,16 вес. %), на «переходном» участке содержится также много палладия (86,30 вес. %) и свинца (6,15 вес. %), а на участке темного цвета — цинк (30,91 вес. %), кислород (30,00 вес. %), относительно мало палладия (21,96 вес. %) и по-прежнему достаточно много свинца (14,05 вес. %).

Таблица 15. Концентрации элементов в выделенных областях на рис. 12, а (в вес. %)

Спектр	Элемент						
	⁸ O	¹³ Al	²⁶ Fe	²⁹ Cu	³⁰ Zn	⁴⁶ Pd	⁸² Pb
1	6,57	0,36	—	7,55	—	71,37	14,16
2	30,00	0,49	0,86	1,75	30,91	21,96	14,05
3	4,00	0,34	—	2,85	0,36	86,30	6,15

Также на рис. 12, б, в представлены два фрагмента вблизи края торца Pd-стержня с указанием участков, в которых был проведен РМЗА. В табл. 16 и 17 приведен их элементный состав.

Таблица 16. Концентрация элементов в точке, отмеченной на рис. 12, б (в вес. %)

Спектр	Элемент					
	⁸ O	¹³ Al	²⁹ Cu	³⁰ Zn	⁴⁶ Pd	⁸² Pb
1	8,32	0,42	7,84	1,47	60,47	21,49

Таблица 17. Концентрация элементов в точке, отмеченной на рис. 12, в (в вес. %)

Спектр	Элемент							
	⁸ O	¹³ Al	¹⁹ K	²⁰ Ca	²⁴ Mn	³⁰ Zn	⁴⁶ Pd	⁸² Pb
1	22,45	0,37	0,38	0,38	0,76	1,79	12,85	61,02

При проведении исследований структуры поверхности торца Pd-стержня были обнаружены своеобразные кратеры (hollows) или выступы (hillocks). На рис. 13 представлено СЭМ-изображение поверхности с выделением четырех точек, в которых был проведен РМЗА. Химический элементный состав в этих точках приведен в табл. 18.

Таблица 18. Концентрации элементов в точках, отмеченных на рис. 13 (в вес. %)

Спектр	Элемент						
	⁸ O	¹³ Al	²⁹ Cu	³⁰ Zn	³⁵ Br	⁴⁶ Pd	⁸² Pb
1	9,38	0,38	10,63	1,96	—	53,35	24,30
2	19,30	0,40	4,67	1,71	—	11,61	62,31
3	3,80	0,27	7,19	—	—	85,22	3,53
4	19,68	—	6,44	13,90	0,47	51,58	7,93

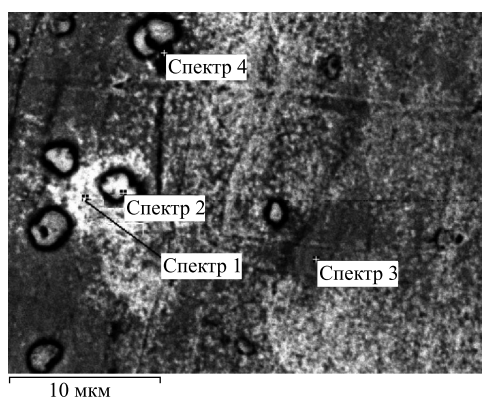


Рис. 13. СЭМ-изображение поверхности торца Pd-стержня со структурами типа кратеров или выступов. РМЗА был проведен в четырех выделенных точках

Как видно из табл. 18, в наиболее светлых точках непосредственно в кратере (спектр 2) РМЗА выявляет концентрации свинца 62,31 вес. % и палладия 11,61 вес. %, а из потоков «лавы» вокруг кратера (спектр 1) — концентрации свинца 24,30 вес. %, палладия 53,35 вес. %, меди 10,63 вес. %.

На рис. 14 представлены СЭМ-изображения похожих участков поверхности торца Pd-стержня. РМЗА проводился как на светлых, так и на темных участках (рис. 14, *a*), а на рис. 14, *б* — только на светлых круглых образованиях.

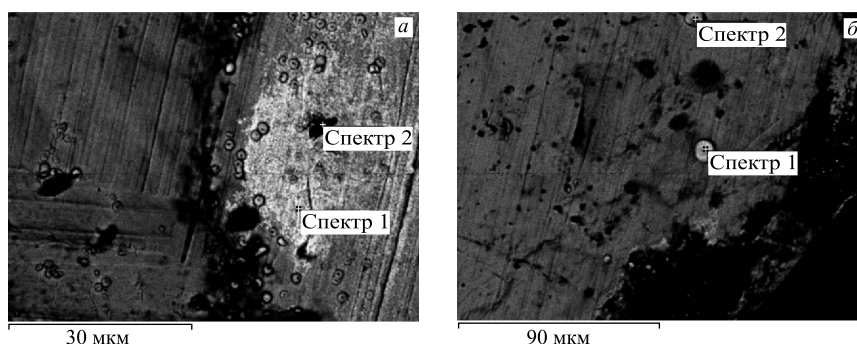


Рис. 14. СЭМ-изображения участков поверхности торца Pd-стержня с РМЗА как светлых, так и темных участков (*a*), и светлых объектов (*б*)

Результаты этого анализа представлены в табл. 19 и 20.

Как и было установлено выше, круглые образования светлого цвета состоят в основном из свинца (65,53 и 62,59 вес. %). Обращает на себя внимание тот факт, что в местах скопления свинца присутствуют также медь, цинк и другие сопутствующие химические элементы.

Таблица 19. Концентрации элементов в светлых и темных участках рис.14, *a* (в вес. %)

Спектр	Элемент								
	⁶ C	⁸ O	¹³ Al	¹⁴ Si	²⁶ Fe	²⁹ Cu	³⁰ Zn	⁴⁶ Pd	⁸² Pb
1	—	8,62	—	—	0,32	5,50	2,78	61,60	21,18
2	8,38	14,36	0,44	26,19	0,44	1,50	6,66	31,05	10,98

Таблица 20. Концентрации элементов в светлых образованиях рис. 14, *б* (в вес. %)

Спектр	Элемент								
	⁸ O	¹³ Al	²⁰ Ca	²⁴ Mn	²⁹ Cu	³⁰ Zn	⁴⁵ Rh	⁴⁶ Pd	⁸² Pb
1	18,97	0,26	—	—	0,60	1,55	1,07	12,03	65,53
2	18,84	0,25	0,34	0,84	0,49	1,29	—	15,36	62,59

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ И РЕНТГЕНОВСКОГО МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО ЗОНДОВОГО АНАЛИЗА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЛАТУННОГО СБОРНИКА СИНТЕЗИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ РЕАКЦИЙ ВНУТРИ ДНРС

В работах [1, 3, 4] на сборнике в результате воздействия γ -квантов на насыщенный дейтерием палладий в атмосфере плотного молекулярного дейтерия при давлении около 3 кбар была обнаружена новая синтезированная структура, состоящая в значительной степени из рутила (диоксида титана). На рис. 15, *a, б* представлены СЭМ-изображения поверхности латунного сборника с синтезированными продуктами реакций (см. также [3], рис. 1, поз. 12).

На поверхности сборника видны даже при малом увеличении ($\times 18$) микрочастицы, которые покрывают всю поверхность сборника, но сконцентрированы преимущественно ближе к краям, образуя кольцо с внешним диаметром 5 мм и внутренним диаметром примерно 2,7 мм.

На рис. 16, *a, б* приведены СЭМ-изображения двух характерных образований, состоящих из отдельных микрочастиц, на поверхности латунного сборника. На рис. 16, *a* видна кольцевая область, в которой проводился РМЗА в двух взятых областях и двух точках, а на рис. 16, *б* — другое образование эллиптического вида, РМЗА проводился в одной точке. В табл. 21 и 22 представлены элементные составы в этих точках (см. пояснения к рис. 17, *a*).

Из табл. 21 и 22 видно: концентрация свинца весьма высокая, доходит до 67,37 вес. %, при этом присутствуют кальций (0,48 вес. %) и железо (1,51 вес. %). А отношение концентраций меди к цинку (Cu/Zn) изменяется от 0,089 до 1,973, что явно не соответствует исходному отношению для латуни.

На рис. 17, *a, б* представлены СЭМ-изображения микрообразований, из которых состоят объединения более крупных структур, сходных по типу пред-

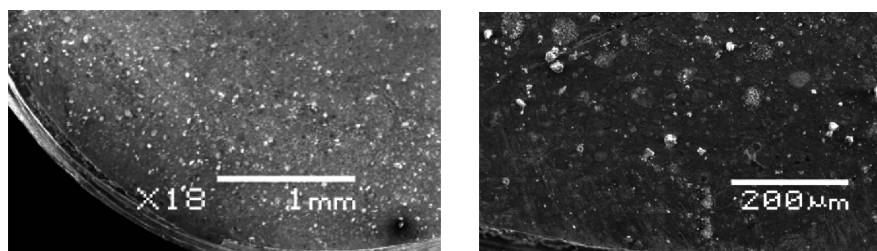


Рис. 15. СЭМ-изображения поверхности латунного сборника с синтезированными продуктами реакций (светлые точки)

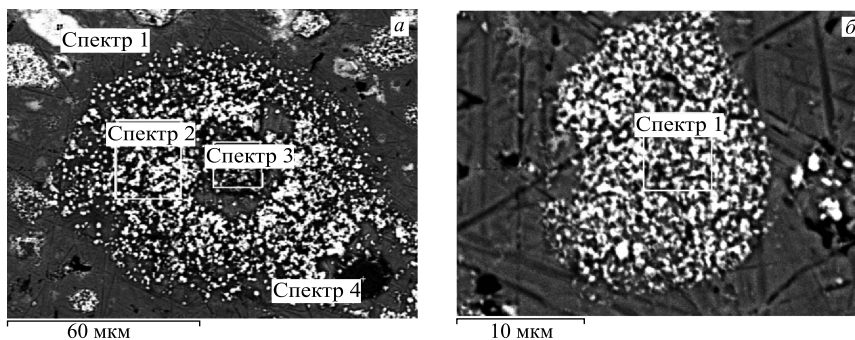


Рис. 16. СЭМ-изображения двух характерных образований — кольцевого (а) и эллиптического (б) вида, которые покрывают поверхность латунного сборника

Таблица 21. Распределение химических элементов в выделенных на рис. 16, а двух областях (спектры 2 и 3) и двух точках (спектры 1 и 4) (в вес. %)

Спектр	Элемент							
	^6C	^8O	^{20}Ca	^{26}Fe	^{29}Cu	^{30}Zn	^{46}Pb	Cu/Zn
1	9,02	17,61	—	—	2,22	3,79	67,37	0,586
2	13,79	17,23	—	0,80	17,25	9,1	41,83	1,896
3	15,82	20,72	0,48	1,51	6,87	10,35	44,25	0,664
4	13,53	26,18	0,44	1,03	2,24	25,08	31,5	0,089

ставленным на рис. 16, а, б, и одиночных мелких структур. РМЗА проведен в выделенной области и трех точках на рис. 17, а и в трех точках на рис. 17, б. В табл. 23 представлен элементный состав выделенной области (спектр 1) и трех точек, указанных на рис. 17, а, а в табл. 24 — трех точек рис 17, б.

Таблица 22. Распределение химических элементов в точке, отмеченной на рис. 16, б (в вес. %)

Спектр	Элемент					Cu/Zn
	^6C	^8O	^{29}Cu	^{30}Zn	^{82}Pb	
1	15,24	10,79	34,98	17,73	21,26	1,973

Таблица 23. Распределение химических элементов в выделенных на рис. 17, а двух областях и двух точках (в вес. %)

Спектр	Элемент						Cu/Zn
	^6C	^8O	^{14}Si	^{29}Cu	^{30}Zn	^{46}Pb	
1	10,14	2,85	—	52,95	32,33	1,72	1,638
2	8,29	11,88	—	6,27	3,37	70,19	1,861
3	9,99	12,56	—	8,18	4,12	65,15	1,985
4	20,87	4,72	10,98	40,54	18,47	4,4	2,195

Таблица 24. Элементный состав на поверхности сборника в трех точках, представленных на рис. 17, б

Элемент	Z	Серия	C, вес. %	C, ат. %	ΔC , вес. %	Cu/Zn
Т. 1 (спектр 1)						
Свинец	82	L	65,08	14,95	2,16	—
Цинк	30	K	4,57	3,33	0,21	—
Медь	29	K	6,65	4,98	0,26	1,50
Кислород	8	K	17,38	51,69	2,79	—
Углерод	6	K	6,32	25,05	1,35	—
Т. 2 (спектр 2)						
Свинец	82	L	10,85	1,60	0,59	—
Цинк	30	K	23,03	10,77	0,21	—
Медь	29	K	36,15	17,40	1,06	1,62
Кислород	8	K	9,54	18,24	1,74	—
Углерод	6	K	20,43	52,00	3,60	—
Т. 3 (спектр 3)						
Цинк	30	K	37,14	36,48	0,21	—
Медь	29	K	62,86	63,52	1,06	1,74

Из табл. 23 видно, что яркие белые гранулы на рис. 17, а в весовом отношении состоят преимущественно из свинца (70,19 и 65,15 вес. %). При этом размер частиц и толщина нанесенного на поверхность латунного сборника слоя этих частиц такова, что даже подложка, состоящая из латуни, слабо просматривается, так как концентрации меди 6,27 и 8,18 вес. % и цинка 3,37 и 4,12 вес. %.

Следует особо отметить, что выделенные кольца (см. спектр 4 на рис. 17, а) отмечают область, в которой производилось измерение ХСРИ.

На рис. 17, в–д представлены результаты трех ХСРИ, измеренных в выделенных т. 1, 2 и 3 на рис. 17, б, для подтверждения достоверности представленных в табл. 24 результатов по концентрациям химических элементов.

В табл. 24 представлен элементный состав в трех выделенных точках на поверхности. Как видно из таблицы, в структуре округлой формы (спектр 1, т. 1) диаметром примерно 3–4 мкм концентрация свинца достигает 14,95 ат. % при наличии около 51,69 ат. % кислорода, что сильно похоже на соединение свинца с кислородом типа PbO_2 , имеющего температуру разложения примерно 290 °С.

В т. 2 (спектр 2), как видно, имеется на поверхности слой свинца (1,6 ат. %), и отношение концентрации меди и цинка несколько увеличивается в сравнении с т. 1 (спектр 1), а именно $Cu/Zn = 1,62$.

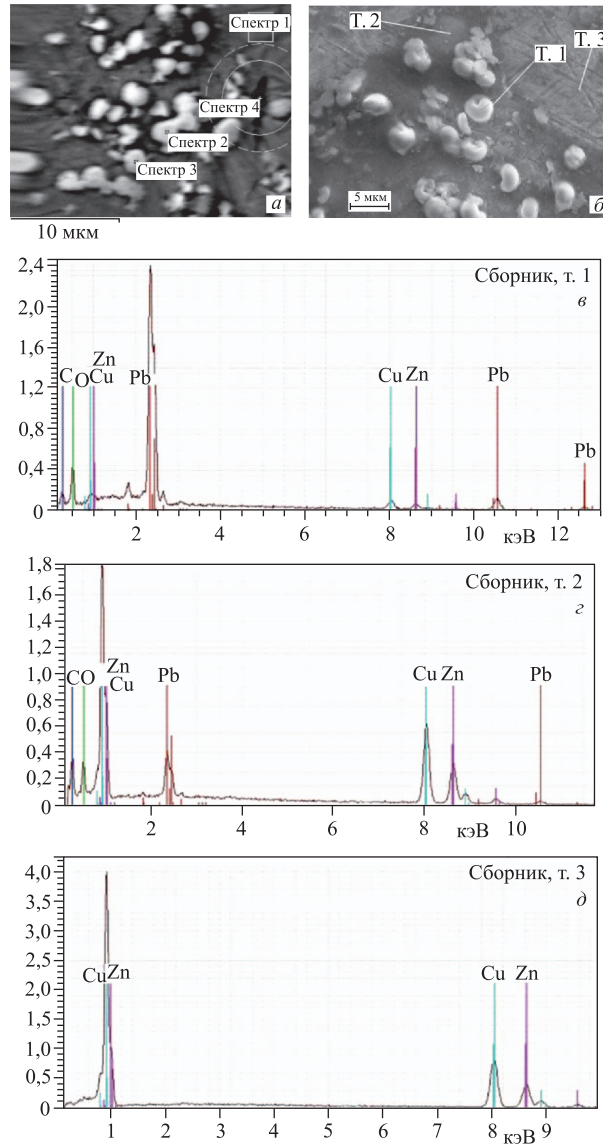


Рис. 17. СЭМ-изображения поверхности латунного сборника с микрообразованиями, из которых состоят объединения более крупных структур (а), то же при большем увеличении (б), и соответствующие ХСРИ (в–д), измеренные на участках поверхности в выделенных точках на рис. б

В то же время на участке латунного сборника (т. 3) РМЗА-измерение с хорошей точностью показывает отсутствие примесей, а соотношение $Cu/Zn = 1,74$ является характерным для данного состава латуни (см. результаты работ [1, 3, 4]).

На рис. 18 представлено СЭМ-изображение участка с несколькими светлыми пятнами, образовавшимися на поверхности латунного сборника, в которых присутствуют элементы с большими атомными номерами. В табл. 25 приведен элементный состав отмеченных участков.

На поверхности латунного сборника обнаружены структуры, такие как на рис. 19, *а*, и проведен РМЗА в выделенных точках, а на рис. 19, *б-г* даны соответствующие ХСРИ.

Результаты РМЗА в т. 4, 5 и 6 (рис. 19, *а*) представлены в табл. 26.

Структура на рис. 19 имеет вид расположенных примерно в центре двух частиц в виде полусфер, разного размера, вокруг которых имеется круговая область типа кратера и присутствует круговой «бруствер». Как и в табл. 24, концентрация свинца в сферических структурах (т. 4) достигает 14,69 ат. % и кислорода до 55,47 ат. %. Концентрация свинца в кольцевой области вокруг сферических образований (т. 5) составляет 1,44 ат. %, в то время как в области типа «бруствера» (т. 6) величины концентраций свинца и кислорода имеют значения 17,22 и 24,02 ат. %. По виду данной структуры можно сделать вывод, что она была выброшена с поверхности Pd-стержня и распространилась по поверхности сборника.

На рис. 20, *а, б* представлены образования, обнаруженные на поверхности латунного сборника в различных местах, на выделенных участках которых

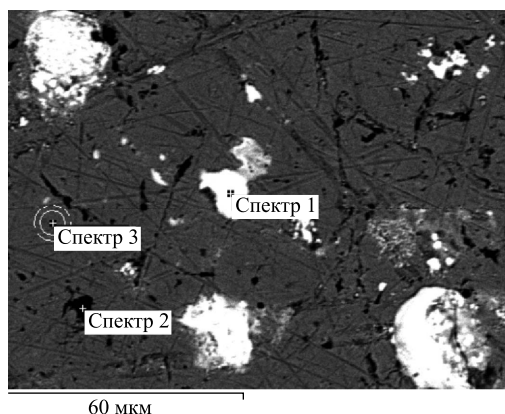


Рис. 18. СЭМ-изображение участка поверхности торца Pd-стержня с несколькими светлыми пятнами, образовавшимися на поверхности латунного сборника, в трех из которых был проведен РМЗА

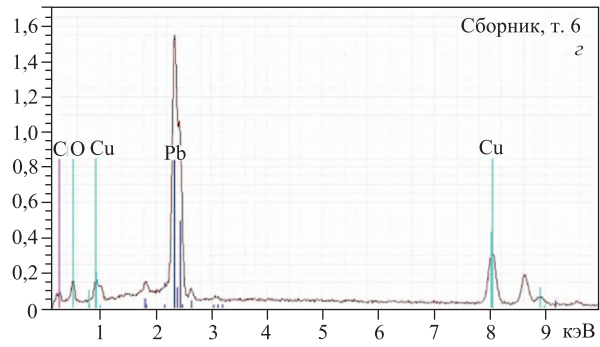
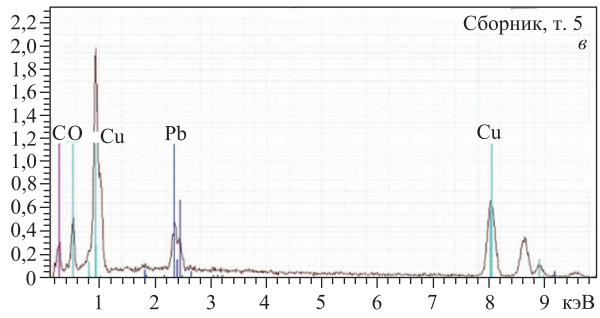
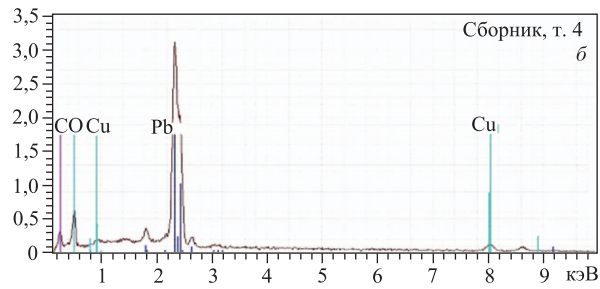
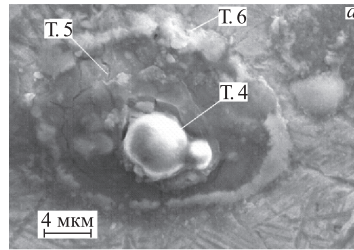


Рис. 19. СЭМ-изображения участка (а) поверхности латунного сборника с тремя выделенными точками и ХСРИ (б-г), в которых был проведен РМЗА

Таблица 25. Распределение химических элементов в трех отмеченных на рис. 18 точках (в вес. %)

Спектр	Элемент							Cu/Zn
	⁶ C	⁸ O	¹⁴ Si	²⁶ Fe	²⁹ Cu	³⁰ Zn	⁸² Pb	
1	10,24	14,22	—	—	2,66	1,01	71,87	2,664
2	23,70	4,91	58,95	0,78	6,20	3,29	2,16	1,884
3	7,93	—	—	—	56,21	35,85	—	1,568

Таблица 26. Элементный состав на поверхности сборника в точках (4, 5 и 6) представленных на рис. 19

Элемент	Z	Серия	C, вес. %	C, ат. %	ΔC , вес. %	Cu/Zn
Т. 4						
Свинец	82	L	67,38	14,69	2,42	—
Медь	29	K	6,22	4,42	0,28	—
Кислород	8	K	19,64	55,47	3,38	—
Углерод	6	K	6,76	25,41	1,58	—
Т. 5						
Свинец	82	L	9,25	1,44	0,71	—
Цинк	30	K	23,87	11,76	0,83	—
Медь	29	K	38,73	19,63	1,28	1,67
Кислород	8	K	12,44	25,04	2,56	—
Углерод	6	K	15,71	42,14	3,72	—
Т. 6						
Свинец	82	L	54,71	17,22	1,84	—
Цинк	30	K	13,64	13,60	0,44	—
Медь	29	K	21,51	22,08	0,63	1,62
Кислород	8	K	5,89	24,02	1,16	—
Углерод	6	K	4,25	23,08	1,00	—

проводился РМЗА, а на рис. 20, *в-д* — ХСРИ этих участков. Эти результаты представлены для подтверждения образования значительного количества свинца при облучении ДНРС при давлении дейтерия внутри камеры примерно $\cong 1,2$ кбар в течение 18 ч при токе электронного пучка 11–13 мкА и при энергии электронов примерно 10 МэВ.

Участок на рис. 20, *а* имеет диаметр примерно 47,33 мкм и относительно рыхлую структуру с порами и выступами. В табл. 27 представлен элементный состав в выделенных на рис. 20, *а* и *б* обл. 7, 8 и 9.

Из этой таблицы хорошо видно, что атомная концентрация свинца в данных структурах типа найденной крупной частицы (обл. 8) и расплава на поверхности латунного сборника (обл. 9) примерно одинаковая: 13,97 и

13,91 ат. % соответственно. При этом наблюдаются очень высокие концентрации кислорода (41,62 и 43,22 ат. %) и углерода (39,10 и 31,56 ат. %) и низкие концентрации меди (3,04 и 6,01 ат. %) и цинка (2,26 и 5,29 ат. %) соответственно.

Практически вся поверхность латунного сборника покрыта помимо крупных объектов (см. рис. 21) более мелкими структурами размерами менее

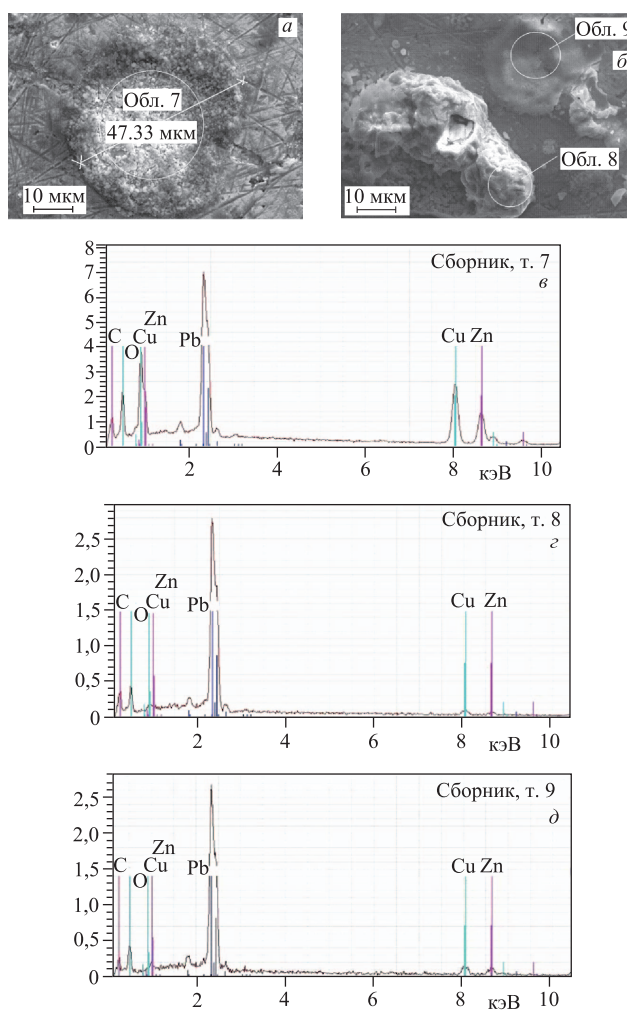


Рис. 20. СЭМ-изображения участка диаметром примерно 47,33 мкм с относительно рыхлой структурой и порами/выступами (а) и крупный объект (б) в центре латунного сборника, с проведением РМЗА в выделенных областях (7, 8 и 9); ХСРИ этих областей (в–д)

1 мкм и чем-то вроде более мелких нитевидных наростов, которые отчетливо видны при большом увеличении: $\times 30000$ на рис. 21, *а*. На рис. 21, *б* приведены более крупные объекты, на фоне которых присутствуют россыпи мелких структур (сверху и снизу изображения). В табл. 28 дан элементный состав выделенных т. 10 и 11 с учетом реально измеряемой области. Из таблицы видно, что, несмотря на значительную область засветки, концентрация свинца в т. 10 достаточно велика (10,76 ат. %) наряду с высокой концентрацией кислорода (49,89 ат. %).

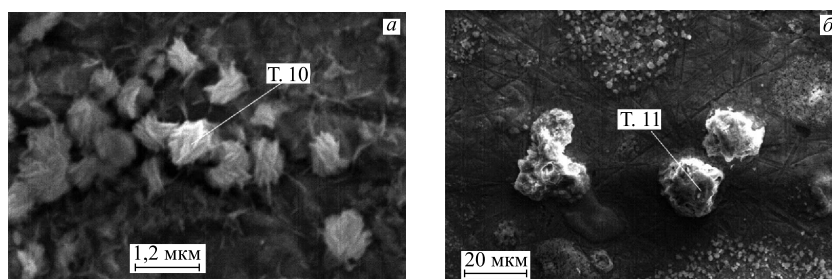


Рис. 21. СЭМ-изображения мелких структур (*а*), покрытых протяженными нитями, и крупных структур (*б*) на фоне более мелких на поверхности латунного сборника с выделением точек, в которых проведен РМЗА (т. 10 и 11)

Таблица 27. Распределение химических элементов в трех отмеченных на рис. 20, *а, б* областях

Элемент	Z	Серия	C, вес. %	C, ат. %	ΔC , вес. %	Cu/Zn
Обл. 7						
Свинец	82	L	32,35	6,34	1,12	—
Цинк	30	K	18,04	11,21	0,54	—
Медь	29	K	27,39	17,52	0,77	1,56
Кислород	8	K	12,17	30,91	1,82	—
Углерод	6	K	10,05	34,01	1,70	—
Обл. 8						
Свинец	82	L	66,22	13,97	2,49	—
Цинк	30	K	3,38	2,26	0,21	—
Медь	29	K	4,42	3,04	0,23	1,35
Кислород	8	K	15,23	41,62	2,96	—
Углерод	6	K	10,74	39,10	2,31	—
Обл. 9						
Свинец	82	L	61,57	13,91	2,92	—
Цинк	30	K	7,39	5,29	0,44	—
Медь	29	K	8,16	6,01	0,45	1,13
Кислород	8	K	14,77	43,22	3,63	—
Углерод	6	K	8,10	31,56	2,52	—

Таблица 28. Элементный состав выделенных на рис. 21, а, б т. 10 и 11

Элемент	Z	Серия	C, вес. %	C, ат. %	ΔC , вес. %	Cu/Zn
Т. 10						
Свинец	82	L	50,76	10,76	2,14	—
Цинк	30	K	10,45	7,02	0,45	—
Медь	29	K	14,54	10,05	0,56	1,43
Кислород	8	K	18,17	49,89	3,48	—
Углерод	6	K	6,09	22,27	1,71	—
Т. 11						
Свинец	82	L	64,87	14,13	2,07	—
Цинк	30	K	4,15	2,86	0,20	—
Медь	29	K	6,55	4,66	0,25	1,63
Кислород	8	K	14,39	40,59	2,37	—
Углерод	6	K	10,04	37,75	1,84	—

Как и в вышеприведенных результатах, в элементных составах структур рис. 21, а и б преобладают в основном: свинец — 10,76 и 14,13 ат. %, кислород — 49,89 и 40,59 ат. % и углерод — 22,27 и 37,75 ат. %.

4. ИЗМЕНЕНИЕ МАССЫ Pd-СТЕРЖНЯ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ γ -КВАНТОВ

Исходная масса Pd-стержня составляла $M_{Pd}^{исх} = 0,7509$ г. После облучения γ -квантами масса Pd-стержня оказалась равной $M_{Pd}^{обл} = 0,71845$ г. Следовательно, абсолютное изменение массы Pd-стержня составило $\Delta M_{Pd} = M_{Pd}^{исх} - M_{Pd}^{обл} = 0,03245$ г, т. е. относительное изменение массы Pd-стержня равно $\delta = \frac{M_{Pd}^{исх} - M_{Pd}^{обл}}{M_{Pd}^{исх}} = 4,3\%$.

Как показали СЭМ-измерения и РМЗА [15], внутренняя поверхность всех конструкций, входящих в ДНРС, а именно: входного окна ([3], рис. 1, поз. 4), включая присутствующую на нем внешнюю резьбу вплоть до кольца уплотнения для высокого давления ([3], рис. 1, поз. 5), внутренних стенок латунной втулки ([3], рис. 1, поз. 8) также с внутренней резьбой с обеих ее сторон, Pd-стержня, латунного сборника ([3], рис. 1, поз. 12) с внешней резьбой на нем — покрыты частицами свинца различных размеров. Зарегистрированные элементы образуют две группы:

1) в диапазоне $Z = 6-30$ (6C , 8O ↓↑, Ne ↑, ${}^{11}Na$, ${}^{12}Mg$, ${}^{13}Al$, ${}^{14}Si$, ${}^{15}P$, ${}^{16}S$, ${}^{17}Cl$, ${}^{18}Ar$ ↑, ${}^{19}K$, ${}^{20}Ca$, ${}^{22}Ti$, ${}^{24}Cr$, ${}^{25}Mn$, ${}^{26}Fe$, ${}^{29}Cu$, ${}^{30}Zn$);

2) тяжелые элементы: ${}^{74}W$, ${}^{78}Pt$, ${}^{79}Au$, ${}^{82}Pb$.

В этот перечень не входят элементы с $Z = 31-73$, которые либо вообще отсутствуют, либо не зарегистрированы.

Если считать, что уменьшение массы Pd-стержня на величину $\Delta M_{Pd} = 0,03245$ г обусловлено образованием самого тяжелого и наиболее широко представленного внутри ДНРС элемента — свинца, который мог образоваться только в результате прошедших при γ -облучении процессов, то можно сделать максимальную оценку его атомарного количества. *Весовая концентрация свинца вне палладия, но который присутствует и в паллади, составляет в большинстве измерений от 50 до 70 вес. %*. Как известно [16–18], свинец обладает следующими характеристиками: массовой плотностью $\rho_{Pb} = 11,350$ г·см⁻³; атомной плотностью $n_{Pb} = 3,298 \cdot 10^{22}$ ат·см⁻³; температурой плавления $T_{пл}^{Pb} = 600,65$ К, температурой испарения $T_{исп}^{Pb} = 2013$ К; молярным объемом $V_{мол} = 18,2555$ см³ при атомной массе $A_{Pb} = 207,2$ а.е.м.

Тогда легко получить, что при занимаемом свинцом суммарном объеме $V_{Pb} \approx \frac{\Delta M_{Pb}}{\rho_{Pb}} = (0,5 - 0,7) \cdot 2,86 \cdot 10^{-3}$ см³ максимальное количество атомов свинца внутри ДНРС будет $N_{Pb}^{max} = V_{Pb} n_{Pb} < (4,7 - 6,6) \cdot 10^{19}$. При оценке введена поправка на измеренную весовую концентрацию свинца вне палладия. Если учесть, что атомы свинца находятся, видимо, в связанных состояниях, например в виде оксидов, то занимаемый этой фазой объем будет даже больше, чем V_{Pb} .

Тем самым эта простая оценка показывает, что при занимаемом соединении свинца объеме $V_{Pb} > (1,4 - 2,0) \cdot 10^{-3}$ см³ максимальное число образовавшихся атомов свинца может достигать макроскопических значений: $N_{Pb}^{max} \propto (4,7 - 6,6) \cdot 10^{19}$!

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В отличие от результатов работ [1, 3, 4], в которых была синтезирована новая структура с относительно высоким содержанием рутила, в данной работе при облучении ДНРС была использована большая плотность потока γ -квантов (ток электронного пучка увеличен примерно в два раза), суммарное время облучения примерно в три раза больше, давление молекулярного дейтерия внутри камеры составляло примерно $\sim 1,2$ кбар. СЭМ-исследования структуры поверхностей всех элементов конструкций, входящих в ДНРС (см. также [15]), и изучение их элементного состава с применением РМЗА позволили установить, что основным, вновь образованным химическим элементом в камере облучения (см. рис. 1 [1, 3, 4]) является свинец. Внутри камеры свинец покрывает: а) входное окно из бериллиевой бронзы (поз. 4), б) обе внутренние поверхности разрезанной латунной втулки (поз. 8), в) самого Pd-стержня (поз. 9), г) разделительной фольги из марганца (поз. 10), д) латунного сборника (поз. 12) [15].

Размеры частиц, состоящих из свинца, оказались значительными — до 20–50 мкм (рис. 20, б 66,22 вес. % и рис. 21, б 64,87 вес. %).

Скорости, с которыми происходит выброс расплавленных кусков свинца с поверхности Pd-стержня, также могут быть существенными, о чем свидетельствует кратер со свинцовым «бруствером» и двумя массивными частями свинца в центре (см. рис. 19, а).

На поверхности торцевой части, приближенной к латунному сборнику, видны кратеры или выступы с застывшими в них частицами свинца в сплаве с палладием (см. рис. 13, табл. 18, спектр 2 — 62,31 вес. % и рис. 14, б, табл. 20, спектры 1 и 2: 65,53 и 62,59 вес. %).

Свинец покрыл значительным слоем и две половинки разрезной латунной втулки, причем он попал и на те резьбовые части, которые находились в резьбовых соединениях деталей с латунным сборником (см. [3], рис. 1, поз. 12) и внутренней поверхностью входного окна из бериллиевой бронзы (см. [3], рис. 1, поз. 4) [15]. А это могло произойти только в случае, если соединение свинца (его оксид) находился в виде пара.

Как известно [16–18], помимо приведенных выше характерных температур, для свинца имеются и другие процессы, которые могли вызвать наблюдаемые эффекты: для оксидов свинца существуют свои температурные интервалы, например, для оксида свинца (PbO) $T_{\text{пл}}^{\text{PbO}} = 886^\circ\text{C}$ и $T_{\text{исп}}^{\text{PbO}} = 1472^\circ\text{C}$, а для двуокиси свинца (PbO_2) нет температуры испарения, но есть температура разложения $T_{\text{разл}}^{\text{PbO}_2} = 290^\circ\text{C}$, а для соединения Pb_3O_4 $T_{\text{пл}}^{\text{Pb}_3\text{O}_4} = 830^\circ\text{C}$. Свинец имеет следующие изотопы: ^{202}Pb ($T_{1/2} \approx 3,5 \cdot 10^5$ лет), ^{204}Pb ($T_{1/2} > 3,5 \cdot 10^{17}$ лет (1,4 %)), ^{205}Pb $T_{1/2} = 1,43 \cdot 10^7$ лет; ^{206}Pb (24,1 %), ^{207}Pb (22,1%) и ^{208}Pb (52,1 %) — стабильные изотопы.

Следует отметить, что измерения ХСРИ показали: свинец находится в окисленном состоянии, поскольку проводимость поверхности, покрытой свинцом, частично обладает диэлектрическими свойствами и заряжается при наборе спектров. Кроме того, в составе этой поверхности присутствует значительное количество кислорода, поэтому, скорее всего, температура повышенной летучести соединений свинца, *возможно*, находится где-то вблизи температуры разложения двуокиси свинца. Но это следует уточнить в следующем эксперименте.

Как надежно установлено при измерениях исходного элементного состава поверхностей всех конструкций, входящих в ДНРС, внутри и снаружи свинец отсутствовал, а самым тяжелым элементом был изотоп палладия $^{110}_{46}\text{Pd}$ (11,72 %).

Остановимся на реакциях, которые бы могли привести к образованию «устойчивых» ядер свинца. Сразу следует отметить, что образование ядер свинца с участием ядер палладия и более легких осколков деления ядер палладия в реакциях с дейтронами, протонами и нейтронами невозможно ввиду нарушения закона сохранения энергии. Дефект масс изотопов свинца изменяется от $\Delta M = -21,759$ МэВ до $-25,942$ МэВ для $^{208}_{82}\text{Pb}$, а дефект

масс для ядер палладия варьируется в пределах от $\Delta M = -88,335$ МэВ до $-89,913$ МэВ для $^{106}_{46}\text{Pd}$ [18, 19]. Осколки деления ядер палладия для *гипотетического образования устойчивых ядер свинца* должны иметь заряды ядер $Z \geq 36$, а для таких ядер значения дефекта масс на примере ядер криптона будет изменяться в пределах $\Delta M = -74,150$ МэВ для $^{78}_{36}\text{Kr}$ (0,35 %) до $\Delta M = -83,263$ МэВ для $^{86}_{36}\text{Kr}$ (17,3 %). Так как минимальное значение дефекта масс для изотопа свинца составляет $\Delta M = -25,942$ МэВ для $^{208}_{82}\text{Pb}$, тогда энергия реакции вида $^{46}\text{Pd} + Z \geq 36 A$ будет значительно меньше -100 МэВ, т.е. $Q = [\Delta M_{^{46}\text{Pd}} + \Delta M_{Z \geq 36 A}] - [\Delta M_{^{82}\text{Pb}} + \Delta M_B] < -100$ МэВ [18–20].

Более того, для получения наиболее легкого изотопа свинца $^{202}_{82}\text{Pb}$ с периодом полураспада $\sim 3 \cdot 10^5$ лет нужен осколок деления с зарядом ядра не менее 36 и массой ядра не менее $A = 92$ а.е.м. даже при слиянии с самым тяжелым изотопом палладия — $^{110}_{46}\text{Pd}$, т.е. что-то типа изотопа криптона $^{92}_{36}\text{Kr}$ с относительно большим периодом полураспада 1,85 с.

Исходя из полученных убедительных, с нашей точки зрения, результатов образование «ядер свинца» в проведенном эксперименте возможно лишь в предположении, что все же ядра палладия как-то взаимодействуют с ядрами типа криптона или более тяжелыми.

В данной работе предлагается один из возможных гипотетических процессов, который кажется маловероятным, но может осуществляться при выполнении законов сохранения энергии-импульса. Обсудим кратко этот подход. При взаимодействии иона с ядром при энергии меньше энергии кулоновского отталкивания

$$E_{\text{иона}} < E_{\text{кул}} = \frac{Z_{\text{иона}} Z_{\text{ядра}} e_0^2}{R_{\text{иона}} + R_{\text{ядра}}} \quad (1)$$

могут реализовываться несколько вариантов рассеяния при различных прицельных параметрах ρ [20]. При касательном соударении, когда при $\rho = R_{\text{иона}} + R_{\text{ядра}}$ наряду с электромагнитным взаимодействием становится возможным ядерное взаимодействие. При этом параметр сближения L_{grazing} , разделяющий чисто электромагнитное взаимодействие от электромагнитного и ядерного, имеет значение

$$L_{\text{grazing}} = \frac{R_{\text{иона}} + R_{\text{ядра}}}{\hbar} \sqrt{2\mu[E - E_{\text{кул}}]}, \quad (2)$$

где $\mu = \frac{M_{\text{иона}} + M_{\text{ядра}}}{M_{\text{иона}} + M_{\text{ядра}}}$ — приведенная масса.

Если два иона с зарядами Z_1 и Z_2 сблизить до расстояния δ , удовлетворяющего условию $R_{\text{ядра}} \ll \delta \ll R_{\text{атома}}$, где $R_{\text{атома}}$ — радиус атома, то с точки зрения электронной оболочки такая система из двух отдельных ядер выглядит как одно ядро с суммарным зарядом $Z = Z_1 + Z_2$. Следовательно, в течение

короткого времени сближения двух ядер, в принципе, может существовать квазиатом, электронная оболочка которого и характеристическое излучение будут соответствовать квазиядру с зарядом $Z = Z_1 + Z_2$ [20].

Квазиклассический подход с введением двугорбого ион-ионного потенциала, описывающего резонансное подбарьерное слияние сферических ядер среднего атомного номера (типа ${}_{40}\text{Zr} + {}_{40}\text{Zr}$), был развит в работах [21–23]. Два барьера позволяют сталкивающимся ядрам находиться на малых расстояниях друг от друга длительное время, что делает возможным образование общей электронной оболочки в системе без составного ядра.

Образование и вращение двойной ядерной системы при глубоконеупругих столкновениях с многонуклонными передачами представлены в монографии [24] (см. также приведенные там ссылки). Такая двойная ядерная система реализуется при больших кинетических энергиях бомбардирующих ионов, что в нашем случае не имеет место.

Тем не менее, несмотря на кажущуюся привлекательность подходов, основанных на образовании квазиатомов с двойными ядрами [20], введение двугорбого ион-ионного потенциала, описывающего резонансное подбарьерное слияние сферических ядер [21–23], остается открытым и совершенно непонятным вопрос о возможных механизмах стабилизации таких систем.

Здесь в качестве возможного механизма приведем результаты по измерению периода полураспада при β^- -распаде атомов с заполненными электронными оболочками и полностью ободранными ядрами. В работах [25–27] представлены две реакции: в частности, для ${}_{75}^{187}\text{Re} \xrightarrow{\beta^-, 4,2 \cdot 10^{10} \text{ лет}} {}_{76}^{187}\text{Os}$ и для полностью ободранного ${}_{75}^{187}\text{Re}^{75+} \xrightarrow{\beta^-, 32,9 \text{ лет}} {}_{76}^{187}\text{Os}^{76+}$ период полураспада уменьшился примерно в $1,3 \cdot 10^9$ раз [25, 26], а стабильный изотоп ${}_{66}^{163}\text{Dy}$ с $Q = -2,565$ кэВ после обдирки стал β^- -радиоактивным: ${}_{66}^{163}\text{Dy}^{66+} \xrightarrow{\beta^-, 47 \text{ сут}} {}_{67}^{163}\text{Ho}^{67+}$ с $Q = +50,3$ кэВ [27].

Из имеющихся экспериментальных данных можно сделать вывод, что по крайней мере некоторые β^- -распадающиеся ядра будут стабилизироваться с увеличением времени жизни вплоть до стабильных при захвате электронов до полной нейтрализации иона.

Для построения хоть какой-нибудь последовательной теории или достоверной гипотезы, объясняющих экспериментальные результаты данной работы, касающиеся обнаружения столь значительных количеств свинца при воздействии γ -квантов, требуется проведение дополнительных экспериментов. В частности, необходимо измерить массу синтезированного изотопа свинца, который был получен в процессе облучения насыщенного дейтерием палладия γ -квантами с энергией 10 МэВ в данном эксперименте. Это будет осуществлено в первую очередь.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Chemical Composition and Structural Phase Changes of Novel Synthesized Structure and of Pd Sample under γ -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.
2. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р., Вилчинска-Китовска Т.* Устройство для получения энергии. Патент на полезную модель № 122197 от 21 июня 2012 г.
3. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* Синтез новых структур в плотном газообразном дейтерии и насыщенном дейтерием палладии при ядерных реакциях, инициированных γ -квантами // *Физика и химия обработки материалов.* 2012. № 5. С. 5–13; Препринт ОИЯИ Р15-2012-50. Дубна, 2012. 16 с.
4. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Nuclear Reactions, Induced by Gamma Quanta, in Palladium Saturated with Deuterium Surrounded by Dense Deuterium Gas // *Eur. Phys. Lett.* 2012. V. 99. P. 22001-P1–22001-P6.
5. *Oppenheimer J. R., Fillips M.* Note for the Transmission Functions for Deuteron // *Phys. Rev.* 1935. V. 48, No. 15. P. 500–502.
6. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Phenomenological Nuclear-Reaction Description in Deuterium-Saturated Palladium and Synthesized Structure in Dense Deuterium Gas under γ -Quanta Irradiation // *Part. Nucl., Lett.* 2013. V. 10, No. 3. P. 437–457; JINR Preprint E15-2012-35. Dubna, 2012. 25 p.
7. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* Ядерные реакции в насыщенном дейтерием палладии и рении в атмосфере плотного дейтерия при облучении γ -квантами непрерывного спектра с граничной энергией 23 МэВ // *Письма в ЭЧАЯ.* 2013. Т. 10, № 4(181). С. 613–631; Препринт ОИЯИ Р15-2012-63. Дубна, 2012. 22 с.
8. *Sierk A. J.* Mass-Asymmetric Fission of Light Nuclei // *Phys. Rev.* 1985. V. 55, No. 6. P. 582–583.
9. *Sierk A. J.* Macroscopic Model of Rotating Nuclei // *Phys. Rev. C.* 1986. V. 33, No. 6. P. 2039–2052.
10. *Moretto Luciano G.* Statistical Emission of Large Fragments: A General Theoretical Approach // *Nucl. Phys. A.* 1975. V. 247. P. 211–230.
11. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* Изменения поверхности, объемных свойств образцов ванадия и нержавеющей стали, облученных в плотном газообразном дейтерии γ -квантами с пороговой энергией 23 МэВ. Препринт ОИЯИ Р15-2012-75. Дубна, 2012. 15 с.; ЖЭТФ. 2013 (в печати).
12. *Ишханов Б. С.* Радиоактивность. М.: Изд-во МГУ, 2010.
13. *Ишханов Б. С., Капитонов И. М., Юдин Н. П.* Частицы и атомные ядра. М.: Изд-во МГУ, 2007.
14. *Ишханов Б. С., Капитонов И. М.* Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами. М.: Изд-во МГУ, 1979. 215 с.
15. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р., Вилчинска-Китовска Т.* Изменения свойств поверхности и элементного состава компонентов камеры высокого давления с Pd-стержнем внутри, облученных 10-МэВ γ -квантами в плотном дейтерии. Препринт ОИЯИ Р15-2013-20. Дубна. 2013. 27 с.

16. WebElements. Periodic Tables of the Elements/Rhenium/crystal structures.
17. Эмсли Дж. Элементы. М.: Мир, 1993. 162 с.;
Emsley J. The Elements. Oxford: Clarendon Press, 1991.
18. Физические величины: Справочник / Под ред. Григорьева И. С. и Мейлихова Е. З. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1233 с.
19. Голашвили Т. В., Чечев В. П., Бадиков С. А. Справочник нуклидов. М.: Изд. дом МЭИ, 2011. 461 с.
20. Мухин К. Н. Экспериментальная ядерная физика. Т. 1: Физика атомного ядра. М.: Энергоатомиздат, 1983. 566 с.
21. Шилов В. М. Подбарьерное слияние сферических ядер среднего атомного номера // Ядерная физика. 2012. Т. 75, №4. С. 485–490.
22. Тараканов А. В., Шилов В. М., Шмидт Р. Квазиклассическое описание слияния тяжелых ядер при околосбарьерных энергиях // Ядерная физика. 1991. Т. 53, №5. С. 1285–1291.
23. Пермяков В. П., Шилов В. М. Подбарьерное слияние сложных ядер // ЭЧАЯ. 1989. Т. 20, вып. 6. С. 1396–1435.
24. Волков В. В. Ядерно-физические исследования с тяжелыми ионами. Избранные работы. Дубна: ОИЯИ, 2012. С. 111–114.
25. Bosch F. et al. Beta Decay of Highly Charged Ions.
<http://www-ap.gsi.de/research/posters/betadecay/betadecayhcinohtml4entities.html>
26. Bosch F. et al. Observation of Bound-State β^- Decay of Fully Ionized ^{187}Re : ^{187}Re – ^{187}Os Cosmochronometry Decay // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 77, No. 26. P. 5190–5193.
27. Jung M. et al. First Observation of Bound-State β^- Decay // Phys. Rev. Lett. 1992. V. 69. No. 15. P. 2164–2167.

Получено 15 февраля 2013 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 09.07.2013.

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

Усл. печ. л. 2,18. Уч.-изд. л. 2,68. Тираж 225 экз. Заказ № 58020.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/