

ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ И ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА Pd-СТЕРЖНЯ И СБОРНИКА ПРОДУКТОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ 10-МЭВ γ -КВАНТАМИ В ПЛОТНОМ ДЕЙТЕРИИ

А. Ю. Дидык ^{а,1}, Р. Вишневецкий ^{б,2}, Т. Вилчинска-Китовска ^б

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Национальный центр ядерных исследований, Отвоцк, Польша

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. 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 ${}^6\text{C}$, ${}^8\text{O}$, ${}^{11}\text{Na}$, ${}^{12}\text{Mg}$, ${}^{13}\text{Al}$, ${}^{14}\text{Si}$, ${}^{22}\text{Ti}$, ${}^{25}\text{Mn}$, ${}^{26}\text{Fe}$, ${}^{29}\text{Cu}$, ${}^{30}\text{Zn}$ также 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.

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.

PACS: 07.89.+b; 25.85.-w; 25.85.Jg

¹E-mail: didyk@jinr.ru

²E-mail: roland.wisniewski@gmail.com

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 [3, 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 наилучшее 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 ДНРС при облучении γ -квантами составляло $P_{\text{D}_2} \cong 1,2$ кбар, что соответствует расчетному значению концентрации молекулярного газообразного дейтерия $N_{\text{D}_2} \cong 1,476 \cdot 10^{22}$ мол. $\text{D}_2/\text{см}^3$ при его плотности $\rho_{\text{D}_2} \cong 0,088$ г/см 3 [1, 3, 6]. ДНРС 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 ДНРС 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 $^{-1} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкА}^{-1}$. Выход нейтронов и протонов из реакции фоторасщепления дейтронов $d(\gamma, n)p$ под действием γ -квантов составлял $Y_{n,p} \approx 0,8 \cdot 10^6$ $n, p \cdot \text{мкА}^{-1}$ (см. расчеты в [1, 3, 4, 6]).

Как и в первом эксперименте [1, 3, 4], после вскрытия ДНРС Pd-стержень (см. рис. 1, поз. 9 в [3]) оказался зажатым внутренней латунной втулкой диаметром 4 мм (см. рис. 1,

поз. 8 в [3]) и был извлечен только после уменьшения его диаметра за счет процессов десорбции дейтерия.

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

2.1. РМЗА торца Pd-стержня (см. рис. 1, поз. 9 в [3]), ближнего к входной диафрагме (см. рис. 1, поз. 4 в [3]). На рис. 1, *а* представлено СЭМ-изображение боковой поверхности Pd-стержня с выделением двух областей, в которых был проведен РМЗА, а на рис. 1, *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. 1, *а* областях (обл. 1 и обл. 2) и в светлой частице (т. 3) (рис. 1, *б*). Отметим, что в отраженных электронах при СЭМ-анализе более светлые участки соответствуют химическим элементам с большими порядковыми номерами (зарядами ядер).

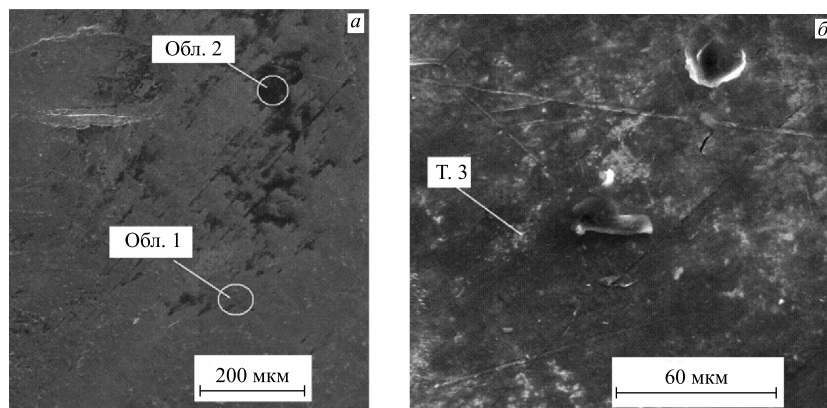


Рис. 1. СЭМ-изображения двух участков поверхности торца Pd-стержня, в которых был проведен РМЗА

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

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 (${}_{82}\text{Pb}$). При этом в исходном тщательно промеренном палладии содержание свинца менее чем 5 ppm (т.е. $< 5 \cdot 10^{-6}$ г/г).

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

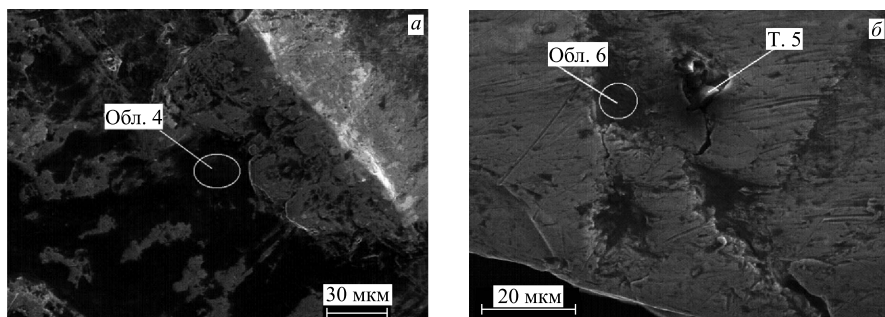


Рис. 2. СЭМ-изображения поверхности участка ближе к центру (а) и краю (б) торца Pd-стержня с указанием областей и точки, в которых был проведен РМЗА

Таблица 2. Распределение химических элементов в обл. 4 (рис. 2, а) и т. 5, обл. 6 (рис. 2, 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

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. 2, 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. 2, б) выявлено, как и выше (см. табл. 1, рис. 1, б, т. 3), значительное количество свинца (5,38 вес. % и 1,11 ат. %).

На рис. 3, а, б представлены СЭМ-изображения двух выбросов из объема Pd-стержня по радиусу, в сторону стенки латунной втулки (см. рис. 1, поз. 8 в [3]), 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.

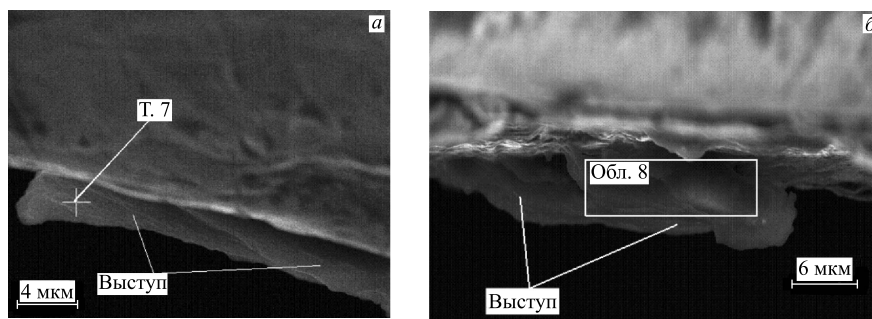


Рис. 3. СЭМ-изображения выбросов из объема Pd-стержня по радиусу, в сторону стенки латунной втулки, с указанием точки (а) и области (б), в которых был проведен РМЗА

Таблица 3. Распределение химических элементов в застывшем выбросе (рис. 3, 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

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. %) и кислород (24,30 ат. %) и алюминий (2,24 ат. %). Обнаружен и свинец (1,09 вес. %).

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

Таблица 4. Распределение химических элементов в застывшем выбросе (рис. 3, б, обл. 8) с торцевой поверхности Pd-стержня

Элемент	C, ат. %	Элемент	C, ат. %	Элемент	C, ат. %
⁸ O	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		

участка, площадь которого равна $15,6 \times 5,3$ мкм. В то же время имеется значительное количество ¹³Al (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.

2.2. Исследование структуры боковой поверхности Pd-стержня и РМЗА элементного состава. На рис. 4 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 ХСРИ¹ можно сделать вывод, что все линии спектра, соответствующие свинцу (⁸²Pb), присутствуют.

На рис. 5 представлено СЭМ-изображение, сделанное в отраженных электронах вдоль трещины на боковой поверхности Pd-стержня, со светлыми участками, соответствующими тяжелым элементам, на которых был проведен РМЗА. В табл. 6 приведены распре-

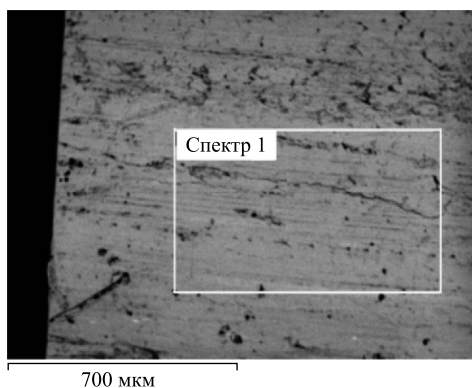


Рис. 4. СЭМ-изображение участка боковой поверхности Pd-стержня с выделенной областью, в которой был проведен РМЗА

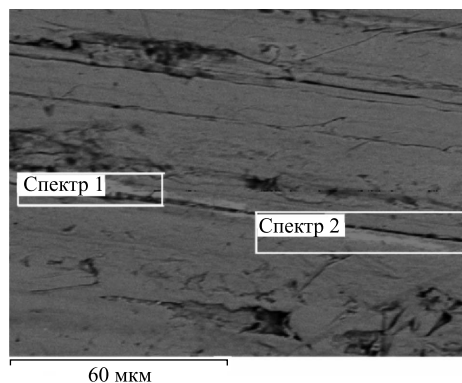


Рис. 5. СЭМ-изображение участка боковой поверхности Pd-стержня вдоль трещины на поверхности со светлыми участками, на которых проведен РМЗА

Таблица 5. Распределение химических элементов в указанной на рис. 4 области (790×480 мкм) (в вес. %)

Спектр	⁸ O	¹² Mg	¹³ Al	²⁶ Fe	⁴⁶ Pd	⁸² Pb
1	7,88	0,30	0,54	0,30	88,41	2,56

¹В большинстве случаев ХСРИ не представлены. Они приводятся только тогда, когда важно показать наличие основных линий тяжелых элементов.

Таблица 6. Распределение химических элементов в двух областях, обозначенных на рис. 5 (в вес. %)

Спектр	^8O	^{13}Al	^{29}Cu	^{46}Pd	^{78}Pt	^{82}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

деления химических элементов в указанных на рис. 5 областях размерами $40 \times 9,7$ и $58 \times 11,5$ мкм.

Из приведенных данных видно, что на отмеченных участках вдоль протяженной трещины в спектрах 1 и 2 (см. табл. 6, рис. 5) присутствуют характеристические рентгеновские линии таких элементов, как платина (^{78}Pt) и свинец (^{82}Pb).

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. 6. Проведен РМЗА участка размером $\approx 14,3 \times 7,1$ мкм (спектр 2) и в точке (спектр 1) соответственно.

В табл. 7 представлены распределения химических элементов в спектрах 1 и 2 (см. рис. 6).

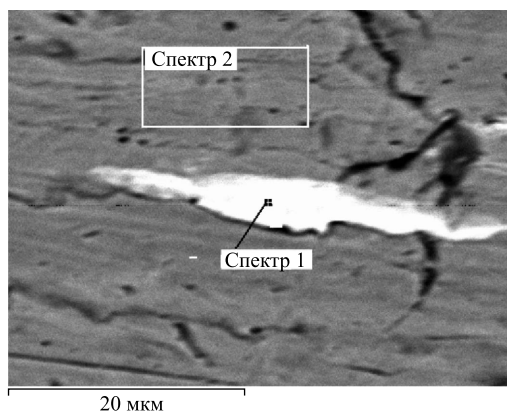
Рис. 6. СЭМ-изображение участка боковой поверхности Pd-стержня размером $14,3 \times 7,1$ мкм и отдельно взятой точки, в которых был проведен РМЗА

Таблица 7. Распределение химических элементов в спектрах 1 и 2 на рис. 6 (в вес. %)

Спектр	^{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

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 ^{78}Pt (66,64 вес. %), ^{79}Au (1,97 вес. %) и ^{82}Pb (1,59 вес. %)! Более светлая область имеет протяженность длиной $\sim 35,9$ мкм и шириной, максимальной по ширине части, $\sim 4,8$ 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 ^{46}Pd , вызывают их асимметричное деление на два осколка [8–10]. Известна работа, в которой наблюдалось деление ^{44}Ru на осколки. Этим можно объяснить появление легких ядер, таких как ^6C , ^8O , ^{11}Na , ^{12}Mg , ^{13}Al и др., включая и летучие изотопы, а также более тяжелых: ^{24}Cr , ^{25}Mn , ^{26}Fe , ^{29}Cu , ^{30}Zn , ^{31}Ga . Вызывают удивление два обстоятельства: аномально большой выход этих элементов и локальный характер их появления. Еще более удивительно появление тяжелых элементов ^{78}Pt , ^{79}Au , ^{82}Pb . В обсуждении результатов и выводах предлагается гипотетическое объяснение этого явления.

2.3. 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. 7 представлены СЭМ-изображения двух участков поверхности правого торца Pd-стержня размерами $82,9 \times 92,7$ мкм (спектр 1) и $68,3 \times 70,7$ мкм (спектр 2) (а) и трех точек (б), в которых был сделан РМЗА.

В табл. 8 приведены концентрации химических элементов, измеренные с помощью РМЗА, в выделенных участках и точках на рис. 7, а и б.

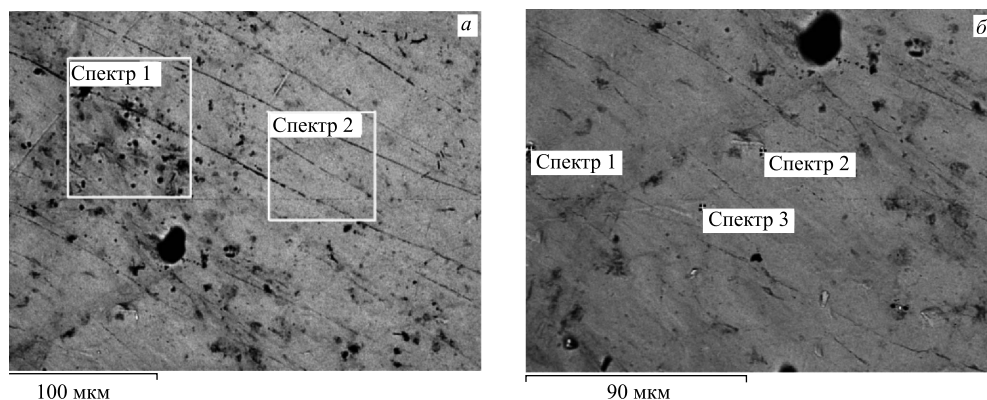


Рис. 7. СЭМ-изображения участков поверхности правого торца Pd-стержня с выделением двух областей (а) и трех точек (б), где сделан РМЗА

Таблица 8. Элементный состав, полученный в двух областях на рис. 7, а и трех точках на рис. 7, б (в вес. %)

Спектр	^6C	^8O	^{13}Al	^{14}Si	^{30}Zn	^{46}Pd	^{82}Pb
Рис. 7, а							
1	0,93	13,53	0,46	0,46	0,91	83,72	—
2	0,16	4,33	0,50	—	—	95,02	—
Рис. 7, б							
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	—

На рис. 8, *а, б* представлены СЭМ-изображения двух участков поверхности правого торца Pd-стержня. На рис. 8, *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. 8, *б* приведена весьма своеобразная структура «пятнистого» типа с выделением двух областей — $17,1 \times 19,6$ мкм (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. 9 приведены концентрации химических элементов в выделенных областях и точках на рис. 8, *а, б*.

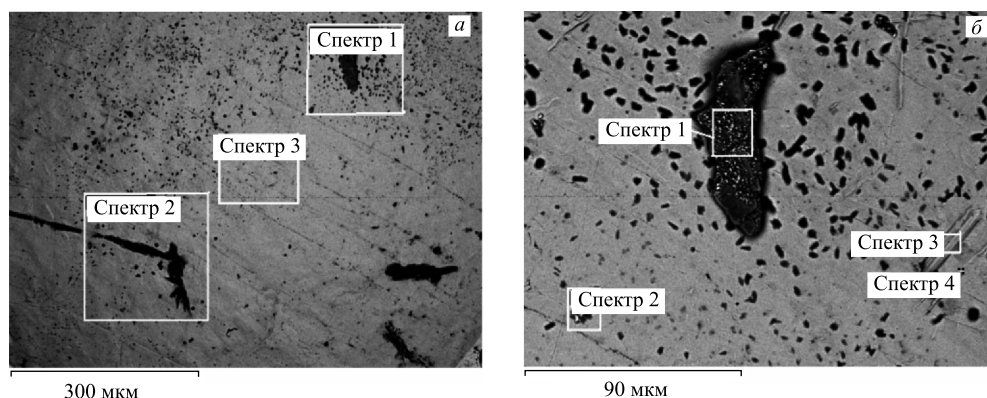


Рис. 8. СЭМ-изображения двух участков поверхности правого торца Pd-стержня в которых был сделан РМЗА

Таблица 9. Концентрации элементов в трех выделенных областях рис. 8, *а* и двух выделенных областях и двух точках на рис. 8, *б* (в ат. %)

Спектр	^8O	^{13}Al	^{14}Si	^{26}Fe	^{29}Cu	^{30}Zn	^{46}Pd	^{82}Pb
Рис. 8, <i>а</i>								
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	—
Рис. 8, <i>б</i>								
1	43,39	0,82	—	0,38	29,48	18,29	3,16	4,48
2	46,97	0,84	0,48	—	—	2,8	48,25	0,66
3	33,93	1,18	0,8	—	—	—	64,09	—
4	—	1,31	0,77	—	—	—	97,92	—

В данном случае две области на рис. 8, *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 (^{46}Pd), — свинца (^{82}Pb) (4,48 ат. %).

На рис. 9, *а* представлено СЭМ-изображение участка темного цвета, показанного на рис. 8, *б*; этот же участок при большем увеличении см. на рис. 9, *б*. РМЗА был проведен в двух точках, результаты которого представлены в табл. 10.

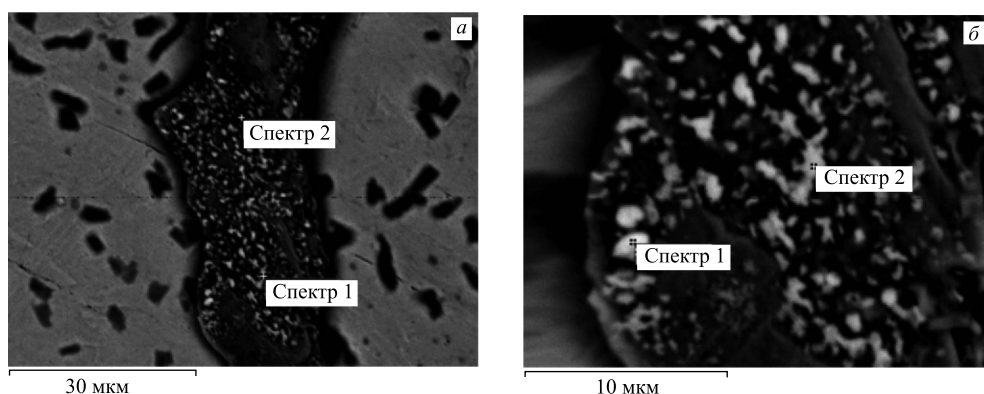


Рис. 9. СЭМ-изображения участка поверхности правого торца Pd-стержня с выделением двух точек, в которых был сделан РМЗА, с разными увеличениями

Таблица 10. Концентрации элементов в выделенных точках на рис. 9, а (в ат. %), б (в вес. %)

Спектр	^{8}O	^{13}Al	^{17}Cl	^{26}Fe	^{29}Cu	^{30}Zn	^{46}Pd	^{82}Pb	Cu/Zn
Рис. 9, а									
1	60,82	0,77	—	—	14,99	9,17	2,28	11,96	1,63
2	32,52	—	0,54	0,44	35,28	25,81	3,22	2,2	1,37
Рис. 9, б									
1	21,59	0,46	—	0,37	10,63	5,58	13,0	48,36	1,91
2	18,57	0,32	—	—	19,57	12,22	3,78	45,55	1,60

Из табл. 10 видно (см. рис. 9, а), 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. 9, б.

Как видно из табл. 10, 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. 10, 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. 11.

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. %).

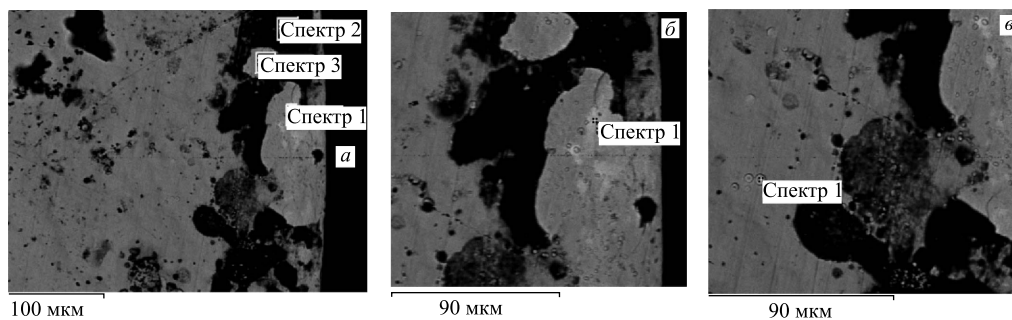


Рис. 10. СЭМ-изображения участка поверхности вблизи края торца Pd-стержня (темные части изображения справа (а, б) с РМЗА в трех областях); то же при большем увеличении (в)

Таблица 11. Концентрации элементов в выделенных областях на рис. 10, а и в отмеченных точках на рис. 10, б (в вес. %)

Спектр	⁸ O	¹³ Al	¹⁹ K	²⁰ Ca	²⁴ Mn	²⁶ Fe	²⁹ Cu	³⁰ Zn	⁴⁶ Pd	⁸² Pb
Рис. 10, а										
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	86,3	6,15
Рис. 10, б										
1	8,32	0,42	—	—	—	—	7,84	1,47	60,47	21,49
Рис. 10, в										
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. 11 представлено СЭМ-изображение поверхности с выделением четырех точек, в которых был выполнен РМЗА. Химический элементный состав в этих точках приведен в табл. 12.

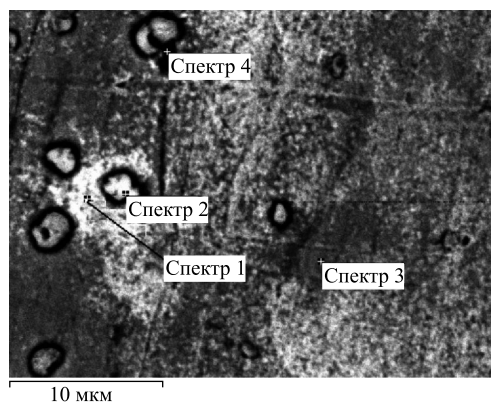


Рис. 11. СЭМ-изображение поверхности торца Pd-стержня со структурами типа кратеров или выступов. РМЗА был проведен в четырех выделенных точках

Таблица 12. Концентрации элементов в точках, отмеченных на рис. 11 (в вес. %)

Спектр	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

Как видно из табл. 12, в наиболее светлых точках непосредственно в кратере (спектр 2) РМЗА выявляет концентрации свинца 62,31 вес. % и палладия 11,61 вес. %, а из потеков «лавы» вокруг кратера (спектр 1) — концентрации свинца 24,30 вес. %, палладия 53,35 вес. %, меди 10,63 вес. %.

На рис. 12 представлены СЭМ-изображения похожих участков поверхности торца Pd-стержня. На рис. 12, а РМЗА проводился как на светлых, так и на темных участках, а на рис. 12, б — только на светлых круглых образованиях.

Результаты этого анализа представлены в табл. 13.

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.

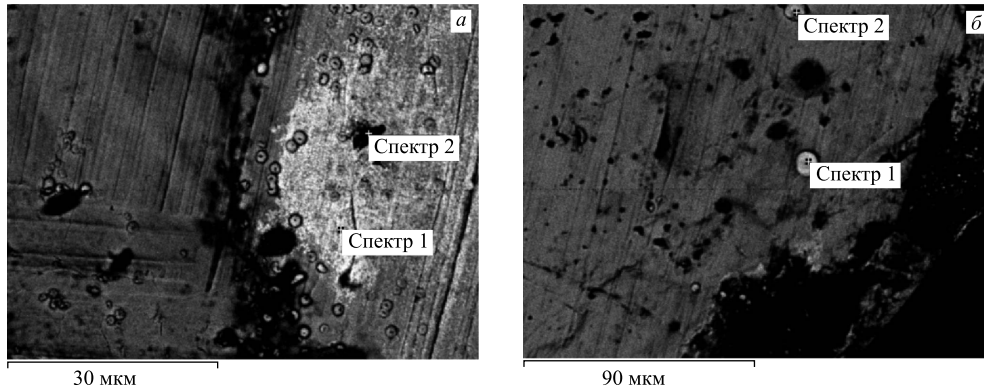


Рис. 12. СЭМ-изображения участков поверхности торца Pd-стержня с РМЗА как светлых, так и темных участков (а) и светлых образований (б)

Таблица 13. Концентрации элементов в светлых и темных участках рис. 12, а и в светлых образованиях рис. 12, б (в вес. %)

Спектр	⁸ C	⁸ O	¹³ Al	¹⁴ Si	²⁰ Ca	²⁴ Mn	²⁶ Fe	²⁹ Cu	³⁰ Zn	⁴⁵ Rh	⁴⁶ Pd	⁸² Pb
Рис. 12, а												
1	—	8,62	—	—	—	—	0,32	5,50	2,78	—	61,6	21,18
2	8,38	14,36	0,44	26,19	—	—	0,44	1,50	6,66	—	31,05	10,98
Рис. 12, б												
1	—	18,97	0,26	—	—	—	—	0,60	1,55	1,07	12,03	65,53
2	18,84	18,84	0,25	—	0,34	0,84	—	0,49	1,29	—	15,36	62,59

Из рис. 11, 12 и табл. 12, 13 можно предположить, что измеренные высокие концентрации свинца на всех внутренних поверхностях элементов ДНРС (см. [15, 16]) были выделены из своеобразных кратеров (hollows) или выступов (hillocks) на поверхности палладия.

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

На рис. 13, *a*, *б* представлены СЭМ-изображения поверхности латунного сборника с синтезированными продуктами реакций (см. также рис. 1, поз. 12 в [3]). Даже при малом увеличении ($\times 18$) видны 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. 14, *a*, *б* приведены СЭМ-изображения двух характерных образований, состоящих из отдельных микрочастиц, на поверхности латунного сборника. На рис. 14, *a* видна кольцевая область, в которой проводился РМЗА в двух взятых областях и двух точках,

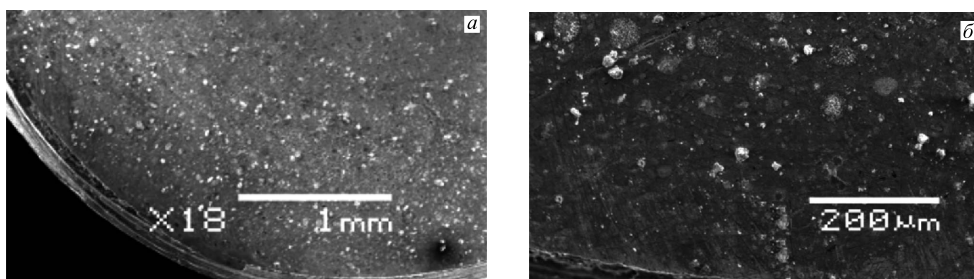


Рис. 13. СЭМ-изображения поверхности латунного сборника с синтезированными продуктами реакций (светлые точки)

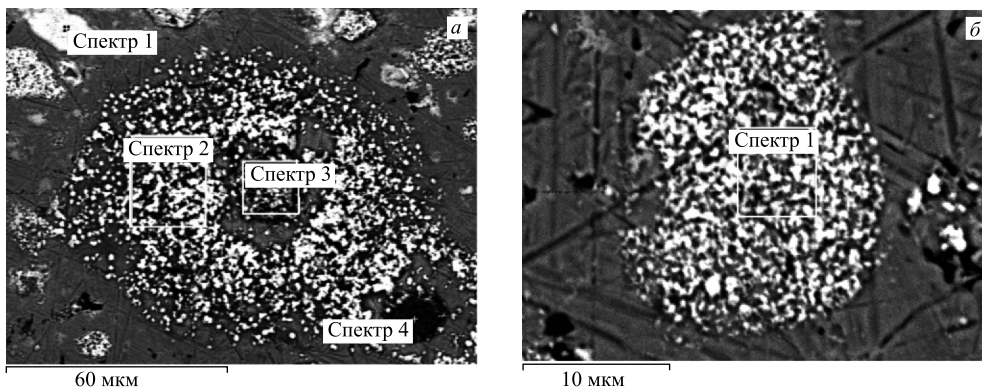


Рис. 14. СЭМ-изображения двух характерных образований — кольцевого (*a*) и эллиптического (*б*) вида, которые покрывают поверхность латунного сборника

а на рис. 14, б — другое образование эллиптического вида, РМЗА проводился в одной точке. В табл. 14 представлены элементные составы в этих точках (см. пояснения к рис. 15, а).

Из табл. 14 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.

Таблица 14. Распределение химических элементов в выделенных на рис. 14, а двух областях (спектры 2 и 3) и двух точках (спектры 1 и 4), а также в точке, отмеченной на рис. 14, б (в вес. %)

Спектр	${}^6\text{C}$	${}^8\text{O}$	${}^{20}\text{Ca}$	${}^{26}\text{Fe}$	${}^{29}\text{Cu}$	${}^{30}\text{Zn}$	${}^{46}\text{Pb}$	Cu/Zn
Рис. 14, а								
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
Рис. 14, б								
1	15,24	10,79	—	—	34,98	17,73	21,26	1,973

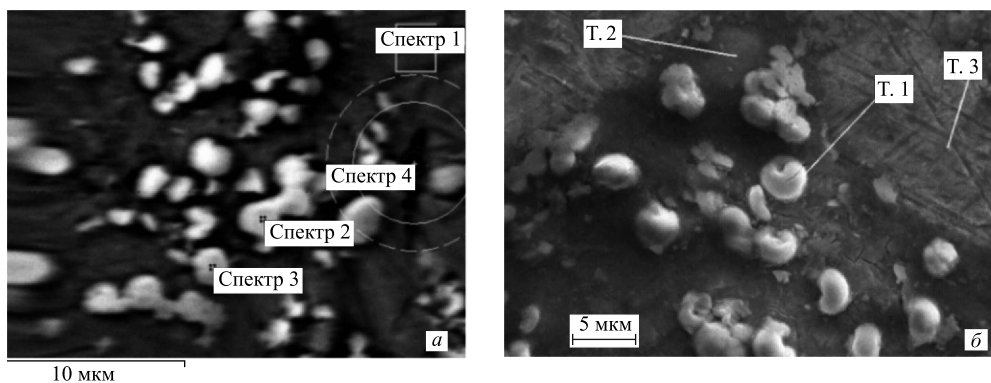


Рис. 15. СЭМ-изображения поверхности латунного сборника с микрообразованиями, из которых состоят объединения более крупных структур (а), то же при большем увеличении (б)

На рис. 15, а, б представлены СЭМ-изображения микрообразований, из которых состоят объединения более крупных структур, сходных по типу представленным на рис. 14, а, б, и одиночных мелких структур. РМЗА проведен в выделенной области и трех точках на рис. 15, а и в трех точках на рис. 15, б. В табл. 15 представлены результаты этого анализа.

Из табл. 15 видно, что яркие белые гранулы на рис. 15, 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. %.

Таблица 15. Распределение химических элементов в выделенных на рис. 15, а двух областях и двух точках, а также в трех точках на рис. 15, б (в вес. %)

Спектр, точка	${}^6\text{C}$	${}^8\text{O}$	${}^{14}\text{Si}$	${}^{29}\text{Cu}$	${}^{30}\text{Zn}$	${}^{46}\text{Pb}$	Cu/Zn
Рис. 15, а							
Спектр 1	10,14	2,85	—	52,95	32,33	1,72	1,638
Спектр 2	8,29	11,88	—	6,27	3,37	70,19	1,861
Спектр 3	9,99	12,56	—	8,18	4,12	65,15	1,985
Спектр 4	20,87	4,72	10,98	40,54	18,47	4,4	2,195
Рис. 15, б							
Точка 1	6,32	17,38	—	6,65	4,57	65,08	1,455
Точка 2	20,43	9,54	—	36,15	23,03	10,85	1,570
Точка 3	—	—	—	62,86	37,14	—	1,693

Как видно из табл. 15, 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°C и не имеющего температуры испарения.

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 $\text{Cu/Zn} = 1,62$.

Ясно также, что концентрации меди и цинка, измеренные в т. 3 (рис. 15, б), показывают отсутствие примесей и соответствуют соотношению меди к цинку (1,69 вес. % и 1,74 ат. %) в материале латуни, из которой сделаны сборник и втулка (см. рис. 1, поз. 12 и 8 в [1, 3, 4] соответственно).

На рис. 16 представлены СЭМ-изображения участков с несколькими светлыми пятнами (а) и полусферическими двойными структурами с кольцевой границей вокруг (б), образовавшимися на поверхности латунного сборника, в которых присутствуют элементы с большими атомными номерами. В табл. 16 приведен элементный состав этих пятен. Как видно, в них содержится до 71,87 вес. % свинца. В темной области (спектр 2) обнаружено значительное количество кремния (58,95 вес. %).

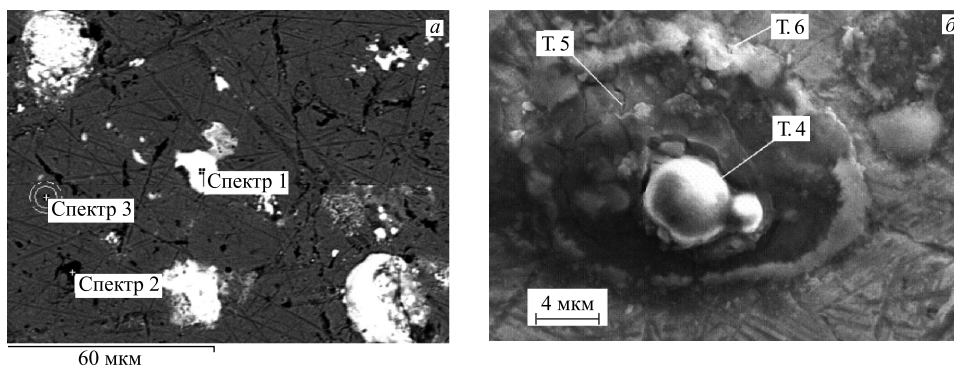


Рис. 16. СЭМ-изображения участков с несколькими светлыми пятнами (а) и полусферическими двойными структурами с кольцевой границей вокруг (б), образовавшимися на поверхности латунного сборника

Таблица 16. Распределение химических элементов в отмеченных участках и точках на рис. 16 (в вес. %)

Спектр, точка	^6C	^8O	^{14}Si	^{26}Fe	^{29}Cu	^{30}Zn	^{82}Pb	Cu/Zn
Рис. 16, а								
Спектр 1	10,24	14,22	—	—	2,66	1,01	71,87	2,664
Спектр 2	23,7	4,91	58,95	0,78	6,20	3,29	2,16	1,884
Спектр 3	7,93	—	—	—	56,21	35,85	—	1,568
Рис. 16, б								
Точка 4	6,76	19,64	—	—	6,22	—	67,38	—
Точка 5	15,71	12,44	—	—	38,73	23,87	9,25	1,623
Точка 6	4,25	5,89	—	—	21,51	13,64	54,71	1,577

Структура на рис. 16, б имеет вид расположенных примерно в центре двух частиц в виде полусфер, разного размера, вокруг которых имеется круговая область типа кратера и присутствует круговой «бруствер». 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, образовав при остывании за счет сил поверхностного натяжения форму полусфер.

На рис. 17, а, б представлены образования, обнаруженные на плоской поверхности латунного сборника, на выделенных участках которых проводился РМЗА.

«Пятно» на рис. 17, а имеет диаметр примерно 47,33 мкм и относительно рыхлую структуру с порами и выступами. В табл. 17 представлен элементный состав в выделенных на рис. 17, а и б обл. 7, 8 и 9.

Из этой таблицы хорошо видно, что атомная концентрация свинца в данных структурах типа найденной крупной частицы длиной 60 мкм (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.

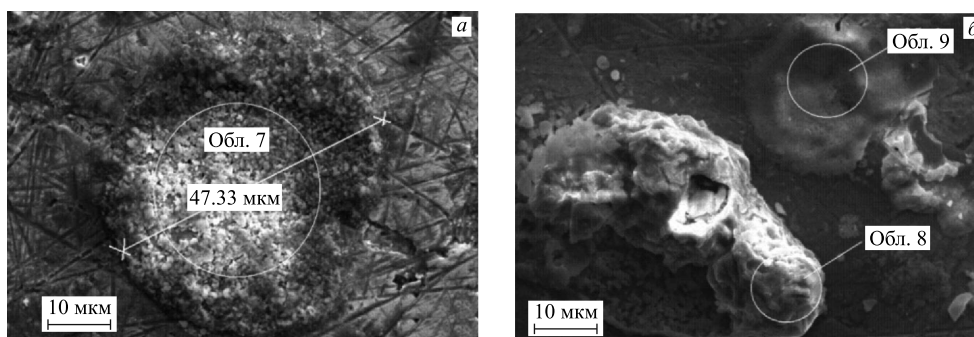


Рис. 17. СЭМ-изображения участка диаметром примерно 47,33 мкм с относительно рыхлой структурой и порами/выступами (а) и крупный объект (б) в центре латунного сборника, с проведением РМЗА в выделенных областях (7, 8 и 9)

Таблица 17. Распределение химических элементов в трех отмеченных на рис. 17, а, б областях

Область, концентрация		${}^6\text{C}$	${}^8\text{O}$	${}^{29}\text{Cu}$	${}^{30}\text{Zn}$	${}^{82}\text{Pb}$	Cu/Zn
Рис. 17, а							
Область 7	<i>C</i> , вес. %	10,05	12,17	27,39	18,04	32,35	1,518
	<i>C</i> , ат. %	34,01	30,91	17,52	11,21	6,34	1,563
Рис. 17, б							
Область 8	<i>C</i> , вес. %	10,74	15,23	4,42	3,38	66,22	1,308
	<i>C</i> , ат. %	39,10	41,62	3,04	2,26	13,97	1,345
Область 9	<i>C</i> , вес. %	8,10	14,77	8,16	7,39	61,57	1,035
	<i>C</i> , ат. %	31,56	43,22	6,01	5,29	13,91	1,136

Практически вся поверхность латунного сборника покрыта помимо крупных объектов (см. рис. 18) более мелкими структурами размерами менее 1 мкм и чем-то вроде более мелких нитевидных наростов, которые отчетливо видны при большом увеличении: $\times 30000$ на рис. 18, а. На рис. 18, б приведены более крупные объекты, на фоне которых присутствуют россыпи мелких структур (сверху и снизу изображения). В табл. 18 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. %).

Как и в вышеприведенных результатах, в элементных составах структур рис. 18, 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. %.

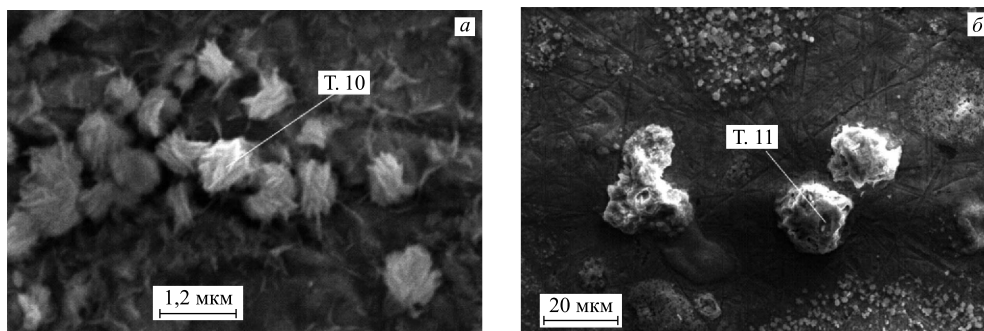


Рис. 18. СЭМ-изображения мелких структур (а), покрытых протяженными нитями, и крупных структур (б) на фоне более мелких на поверхности латунного сборника с выделением точек, в которых проведен РМЗА (т. 10 и 11)

Таблица 18. Распределение химических элементов в т. 10 и 11 на рис. 18, а, б

Область, концентрация		${}^6\text{C}$	${}^8\text{O}$	${}^{29}\text{Cu}$	${}^{30}\text{Zn}$	${}^{82}\text{Pb}$	Cu/Zn
Рис. 18, а							
Область 10	<i>C</i> , вес. %	6,09	18,17	14,54	10,45	50,76	1,391
	<i>C</i> , ат. %	22,27	49,89	10,05	7,02	10,76	1,432
Рис. 18, б							
Область 11	<i>C</i> , вес. %	10,04	14,39	6,55	4,15	64,87	1,578
	<i>C</i> , ат. %	37,75	40,59	4,66	2,86	14,13	1,629

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 (рис. 1, поз. 4 в [3]), включая присутствующую на нем внешнюю резьбу вплоть до кольца уплотнения для высокого давления (рис. 1, поз. 5 в [3]), внутренних стенок лагунной втулки (рис. 1, поз. 8 в [3]) также с внутренней резьбой с обеих ее сторон, Pd-стержня (рис. 1, поз. 9 в [3]), лагунного сборника (рис. 1, поз. 12 в [3]) с внешней резьбой на нем — покрыты частицами свинца различных размеров (см. рис. 1 в [1, 3, 4]). Зарегистрированные элементы образуют две группы:

1) в диапазоне $Z = 6-30$ (${}^6C, {}^8O, {}^{10}Ne, {}^{11}Na, {}^{12}Mg, {}^{13}Al, {}^{14}Si, {}^{15}P, {}^{16}S, {}^{17}Cl, {}^{18}Ar, {}^{19}K, {}^{20}Ca, {}^{22}Ti, {}^{24}Cr, {}^{25}Mn, {}^{26}Fe, {}^{29}Cu, {}^{30}Zn$);

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 палладии, составляет в большинстве измерений от 50 до 70 вес.%. Как известно [17–19], 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; мольным 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 соединениями 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, 16]), и изучение их элементного состава с применением РМЗА позволили установить, что основным, вновь образованным химическим элементом в камере облучения (см. рис. 1 в [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, 16].

Размеры частиц, состоящих из свинца, оказались значительными — до 20–50 мкм (рис. 17, б 66,22 вес. % и рис. 18, 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 частицами свинца в центре (см. рис. 16, 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. 11, табл. 12, спектр 2 — 62,31 вес. % и рис. 12, б, табл. 13, 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. рис. 1, поз. 12 в [1, 3, 4]) и внутренней поверхностью входного окна из бериллиевой бронзы (см. рис. 1, поз. 4 в [1, 3, 4]) [15, 16]. А это могло произойти только в случае, если соединение свинца (его оксид) находилось в виде пара.

Как известно [17–19], 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 (PbO₂) нет температуры испарения, но есть температура разложения $T_{\text{разл}}^{\text{PbO}_2} = 290^\circ\text{C}$, а для соединения Pb₃O₄ $T_{\text{пл}}^{\text{Pb}_3\text{O}_4} = 830^\circ\text{C}$. 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. Фоторасщепление дейтрона, термоядерные и ядерные реакции деления в дейтерированном металле и плотном молекулярном дейтерии с различными вероятностями процессов под действием γ -квантов с энергией больше энергии связи дейтрона ($E_\gamma > W_d = 2,22$ МэВ) представлены в [1, 3, 6, 7]. Помимо рассмотренных реакций

следует также учесть и атомные процессы, связанные с рассеянием γ -квантов на атомах, такие как комптон-эффект, фотоэффект и рождение пар. Также необходимо принять во внимание и процессы упругого рассеяния γ -квантов на легких ядрах (протонах, дейтронах) с максимально переданной им энергией $T_{\max} = E_{\gamma}(1 + Mc^2/E_{\gamma})$, где M — масса ядра. Тогда при энергии γ -квантов $E_{\gamma} = 5$ МэВ имеем $T_{\max}^p = 26,5$ МэВ и $T_{\max}^d = 13,6$ МэВ для протона и дейтрона соответственно. Следует отметить, что образование ядер свинца с участием ядер палладия и осколков деления ядер палладия с зарядом осколков более $Z_{\text{оск}} \geq 36$ в реакциях с дейтронами, протонами и нейтронами невозможно ввиду нарушения закона сохранения энергии. Действительно, 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 $^{106}_{46}\text{Pd}$ [19, 20]. 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 $^{208}_{82}\text{Pb}$, энергия реакции вида $^{46}_{46}\text{Pd} + Z \geq 36 A$ 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 [19, 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 $\rho = R_{\text{иона}} + R_{\text{ядра}}$, 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.

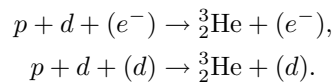
Образование и вращение двойной ядерной системы при глубоконеупругих столкновениях с многонуклонными передачами представлены в монографии [24] (см. также приведенные там ссылки). Такая двойная ядерная система реализуется при больших кинетических энергиях бомбардирующих ионов, что в нашем случае не имеет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

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 вопросом 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.

Представляет интерес привести здесь результаты работ [29, 30], в которых рассматриваются ядерные реакции 2-го порядка, так называемая твердотельная внутренняя конверсия, с помощью третьей заряженной частицы (electron or heavy charge particle assisted nuclear processes), такие как:



В этих реакциях энергия возбуждения составного ядра не излучается в виде энергичного γ -кванта с $E_\gamma \approx Q$, а возбуждение снимается кинетическими энергиями легкого и более тяжелого продукта реакции. В обзорной работе авторов [29, 30] делается вывод, что если помогающей (assisted) частицей является протон, то в протонно-ассоциированной реакции ядерного захвата создается энергичный протон с энергиями порядка нескольких МэВ, который при его последующих процессах замедления может создавать вторичные свободные протоны, если такие протоны присутствуют в кристалле. Такие вторичные протоны могут принимать дальнейшее участие в протонно-ассоциированных реакциях ядерного синтеза. Таким образом, вторичные протоны могут играть такую же роль, как вторичные нейтроны в случае ядерного деления, создавая цепные реакции деления.

Тем не менее для построения последовательной теории или достоверной гипотезы, объясняющей экспериментальные результаты данной работы, касающиеся обнаружения столь значительных количеств свинца при воздействии γ -квантов, как, впрочем, и результаты работ [1, 3, 4, 6, 7, 11, 15, 16], требуется проведение дополнительных экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 P15-2012-50. 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 // *Phys. 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 P15-2012-63. Дубна, 2012. 22 с.
8. *Moretto Luciano G.* Statistical Emission of Large Fragments: A General Theoretical Approach // *Nucl. Phys. A.* 1975. V. 247. P. 211–230.
9. *Sierk A. J.* Mass-Asymmetric Fission of Light Nuclei // *Phys. Rev.* 1985. V. 55, No. 6. P. 582–583.
10. *Sierk A. J.* Macroscopic Model of Rotating Nuclei // *Phys. Rev. C.* 1986. V. 33, No. 6. P. 2039–2052.
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 P15-2012-75. Дубна, 2012. 15 с.; ЖЭТФ. 2013 (в печати).
12. *Ишханов Б. С.* Радиоактивность. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2010.
13. *Ишханов Б. С., Капитонов И. М., Юдин Н. П.* Частицы и атомные ядра. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2007.
14. *Ишханов Б. С., Капитонов И. М.* Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 215 с.
15. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р., Вилчинска-Китовска Т.* Изменения структуры поверхности и элементного состава Pd-стержня и сборника продуктов ядерных и химических реакций, облученных 10-МэВ γ -квантами в плотном дейтерии. Препринт ОИЯИ P15-2013-15. Дубна, 2013. 39 с.
16. *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 P15-2013-20. Дубна, 2013. 27 с.

17. WebElements. Periodic Tables of the Elements/Rhenium/Crystal Structures.
18. Эмсли Дж. Элементы. М.: Мир, 1993. 162 с.;
Emsley J. The Elements. Oxford: Clarendon Press, 1991.
19. Физические величины: Справ. / Под ред. И. С. Григорьева и Е. З. Мейлихова М.: Энергоатомиздат, 1991. 1233 с.
20. Голашвили Т. В., Чечев В. П., Бадиков С. А. Справочник нуклидов. М.: Изд. дом МЭИ, 2011. 461 с.
21. Мухин К. Н. Экспериментальная ядерная физика. Т. 1: Физика атомного ядра. М.: Энергоатомиздат, 1983. 566 с.
22. Шилов В. М. Подбарьерное слияние сферических ядер среднего атомного номера // ЯФ. 2012. Т. 75, № 4. С. 485–490.
23. Тараканов А. В., Шилов В. М., Шмидт Р. Квазиклассическое описание слияния тяжелых ядер при околосбарьерных энергиях // ЯФ. 1991. Т. 53, № 5. С. 1285–1291.
24. Пермяков В. П., Шилов В. М. Подбарьерное слияние сложных ядер // ЭЧАЯ. 1989. Т. 20, вып. 6. С. 1396–1435.
25. Волков В. В. Ядерно-физические исследования с тяжелыми ионами. Избр. работы. Дубна: ОИЯИ, 2012. С. 111–114.
26. Bosch F. et al. Beta Decay of Highly Charged Ions.
<http://www-ap.gsi.de/research/posters/betadecay/betadecayhcinohtml4entities.html>.
27. 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.
28. Jung M. et al. First Observation of Bound-State β^- Decay // Phys. Rev. Lett. 1992. V. 69, No. 15. P. 2164–2167.
29. Kálmán P., Keszthelyi T. Solid State Internal Conversion // Phys. Rev. C. 2004. V. 69. P. 031606-1–031606-3.
30. Kálmán P., Keszthelyi T. Lattice Effect in Solid State Internal Conversion // Phys. Rev. C. 2009. V. 79. P. P031602-1–031606-4.

Получено 25 марта 2013 г.