

P15-2013-80

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

ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ  
И ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА Pd-СТЕРЖНЯ  
И СБОРНИКА ПРОДУКТОВ РЕАКЦИЙ,  
ОБЛУЧЕННЫХ 10 МэВ-НЫМИ ТОРМОЗНЫМИ  
 $\gamma$ -КВАНТАМИ В МОЛЕКУЛЯРНОМ ВОДОРОДЕ  
ПРИ ДАВЛЕНИИ 2,5 кбар

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

---

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

\* E-mail: didyk@jinr.ru

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

Дидык А. Ю., Вишнеvский Р.

P15-2013-80

Изменения структуры и элементного состава Pd-стержня и сборника продуктов реакций, облученных 10 МэВ-ными тормозными  $\gamma$ -квантами в молекулярном водороде при давлении 2,5 кбар

Исследованы элементный состав и структура поверхности палладиевого стержня, насыщенного водородом, и латунного сборника продуктов ядерных и химических реакций, облученных тормозными гамма-квантами с энергией 10 МэВ в атмосфере плотного молекулярного водорода при давлении 2,5 кбар. Обнаружены изменения как химического состава, так и структуры поверхности палладия и латунного сборника, похожие на изменения состава и структуры поверхности при проведении аналогичного эксперимента, но в атмосфере плотного газообразного дейтерия. Предложены некоторые возможные объяснения впервые обнаруженного эффекта.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2013

Didyk A. Yu., Wiśniewski R.

P15-2013-80

Structure and Chemical Composition Changes of Pd-Rod and Reaction Product Collector Irradiated by 10 MeV Braking Gamma Quanta inside High Pressure Chamber Filled with 2.5 kbar Molecular Hydrogen

A research of the elemental composition and surface structure of a Pd rod saturated with hydrogen and a brass collector of nuclear and chemical reaction products irradiated by 10 MeV braking gamma quanta in dense molecular hydrogen gas at 2.5 kbar pressure is carried out. The changes of the elemental composition and surface structure of the Pd rod and collector similar to analogous changes in the experiment carried out in dense gas deuterium are observed. Possible explanations of the firstly observed phenomenon are offered.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2013

## ВВЕДЕНИЕ

Результаты исследований образцов чистых металлов Al, V, Cu, Pd, Re, а также сплавов  $\text{YMP}_2$  и нержавеющей стали при давлениях дейтерия 1,2, 2 и 3 кбар при облучении  $\gamma$ -квантами с пороговыми энергиями 9, 10, 11 и 23 МэВ (т. е. в области гигантского дипольного резонанса [1]), представлены в работах [2–13]. Устройство для получения энергии описано в [14]. Были обнаружены значительные изменения поверхности, объемных свойств и элементного состава всех компонент внутри камеры высокого давления дейтерия (ДНРС).

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

На основе установленных эмпирических закономерностей в образовании в результате ядерных реакций химических элементов в столь широком диапазоне зарядов ядер была предложена феноменологическая модель, учитывающая, как нам казалось, большинство возможных, то есть не запрещенных, ядерных реакций, даже тех, которые имеют предельно малые вероятности (см. [14]). В рамках этой модели рассмотрены процессы фоторасщепления дейтронов под действием  $\gamma$ -квантов с энергиями больше энергии связи дейтрона ( $E_\gamma > W$ ) с образованием «горячих» протонов и нейтронов с энергиями, примерно равными  $0,5(E_\gamma - W)$ . Далее следует нагревание «холодных» атомов дейтерия за счет упругого рассеяния на них «горячих» протонов с атомарными сечениями упругого рассеяния. А для описания процессов дополнительного образования «горячих» протонов с относительно большими энергиями и с одновременной передачей нейтронов при столкновении «горячих» дейтронов с ядрами мишени была привлечена модель Оппенгеймера [15]. Для описания протекающих процессов деления ядер мишени, включая и асимметричное деление, с образованием более легких продуктов реакций, была использована капельная модель ядра [16], в рамках которой происходит понижение барьера деления ядер средних масс ( $Z > 46$ ) в зависимости от углового момента [17–19]. Помимо этого для объяснения процессов слияния ядер было предложено использовать квазиклассический подход с двугорбым

ион-ионным потенциалом, описывающий резонансное подбарьерное слияние сферических ядер средних атомных номеров (типа  ${}_{40}\text{Zr} + {}_{40}\text{Zr}$ ), который был развит в работах [20–22]. Два барьера позволяют сталкивающимся ядрам находиться на малых расстояниях друг от друга длительное время, что делает возможным образование общей электронной оболочки в системе даже без образования составного ядра (см. с. 435–442 в [16]).

Представляет интерес привести здесь результаты работ [23, 24], 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»). В обзорной работе авторов [23, 24] 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.

Процитируем основные выводы работы [25], в которой рассмотрена интерпретация явления кластерной радиоактивности, основанная на процессе формирования кластера путем последовательной, то есть без возбуждения, передачи валентных нуклонов  $\alpha$ -частице и последующим легким ядрам, что приводит к образованию ядерной молекулы с выделением значительной энергии и возможному квантово-механическому проникновению легкого ядра через выходной барьер деления.

Образование и вращение двойной ядерной системы при глубоконеупругих столкновениях с многонуклонными передачами представлено в монографии [26]. Такая двойная ядерная система реализуется при больших кинетических энергиях бомбардирующих ионов, что в нашем случае, по-видимому, не имеет места. Краткое описание вышеперечисленных процессов для возможного объяснения обнаруженных аномалий в изменениях структуры поверхности и объема, а также элементного состава изученных различных материалов представлено в работе [27].

Целью настоящей работы являлась проверка предложенного выше феноменологического подхода для описания процессов протекания ядерных реакций [14] и модельных подходов [16–24], но с заменой плотного дейтерия на плотный газообразный молекулярный водород с изучаемым образцом из особо чистого палладия, помещенного, как и ранее, в камеру высокого давления водорода, так называемую ННРС (high hydrogen pressure chamber), при облучения  $\gamma$ -квантами для проверки предложенных модельных подходов [14–25].

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Камера облучения с Pd-стержнем внутри ННРС, заполненная молекулярным водородом до давления 2,5 кбар, детально описана в [2–4, 13]. Облучение ННРС было проведено тормозными  $\gamma$ -квантами на ускорителе электронов МТ-25. Энергия электронного пучка составляла 10,3 МэВ; тормозная мишень была из вольфрама толщиной 3 мм, затем располагался поглотитель электронов из алюминия толщиной 25 мм. Расстояние от поглотителя до ННРС (мишени) составляло 5 мм, диаметр пучка электронов не превышал 12 мм, температура облучения была 27,4 °С и измерялась термопарой. Принудительное охлаждение ННРС не использовалось. Ток электронного пучка находился в пределах 2–4 мкА, а средний ток примерно 2,5 мкА, длительность облучения составила 7 ч, т. е.  $2,5 \cdot 10^4$  с. Для проверки измерения давления в камере датчиком на основе манганина после завершения облучения тормозными  $\gamma$ -квантами W-тормозная мишень и Al-поглотитель были убраны и в течение 12 мин (720 с) ННРС облучалась электронным пучком при токе электронов от 2,5 до 3,5 мкА. При этом температура во внешней оболочке камеры достигла 60 °С, а давление внутри камеры изменилось (уменьшилось) на 80 атм.

После облучения, более длительного тормозными  $\gamma$ -квантами ( $2,5 \cdot 10^4$  с) и короткого электронами (720 с), камера была вскрыта.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ Pd-СТЕРЖНЯ И СБОРНИКА ПРОДУКТОВ ЯДЕРНО-ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОСКОПИИ (СЭМ) И РЕНТГЕНОВСКОГО МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО ЗОНДОВОГО АНАЛИЗА (РМЗА)

**2.1. Исследование боковой поверхности Pd-стержня.** На рис. 1 представлено СЭМ-изображение развитой трещины на боковой поверхности Pd-стержня.

В табл. 1 представлен элементный состав, полученный РМЗА в выделенной области на рис. 1.

Видно, что как и в случае облучения ДНРС с Pd-стержнем при давлении 1,2 кбар (см. [7, 8]), при изучении элементного состава вблизи трещины на боковой поверхности

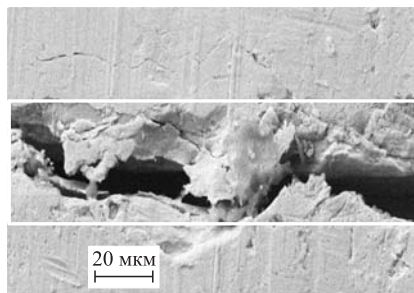


Рис. 1. СЭМ-изображение трещины на боковой поверхности Pd-стержня. В выделенной области сделан РМЗА

Таблица 1. Элементный состав в выделенной области на рис. 1

ZN	Серия	C, вес. %	C', ат. %
${}_6\text{C}$	K	8,14	27,57
${}_8\text{O}$	K	16,32	41,51
${}_{13}\text{Al}$	K	1,90	2,87
${}_{14}\text{Si}$	K	0,25	0,36
${}_{26}\text{Fe}$	K	0,32	0,23
${}_{30}\text{Zn}$	K	1,17	0,73
${}_{46}\text{Pd}$	L	67,79	25,93
${}_{82}\text{Pb}$	M	4,12	0,81

Pd-стержня обнаружен свинец в весовом количестве 4,12 вес. % (0,81 ат. %). Помимо свинца присутствуют такие элементы, как  ${}_6\text{C}$ ,  ${}_{13}\text{Al}$ ,  ${}_{14}\text{Si}$ ,  ${}_{26}\text{Fe}$  и  ${}_{30}\text{Zn}$ . Причем цинк (0,73 ат. %) и алюминий (2,87 ат. %) присутствуют в количествах, за пределами точности измерения методом РМЗА.

На рис. 2 представлено СЭМ-изображение в отраженных электронах другой трещины на боковой поверхности Pd-стержня и две области (светлая и темная), в которых был проведен РМЗА (рис. 2, а), и характеристический спектр из области 2 (рис. 2, б).

Площади, на которых проводилось сканирование при измерении РМЗА-спектров, одинаковые —  $S_{1,2} = 16,92 \text{ мкм}^2$  при размерах  $4,641 \times 3,646 \text{ мкм}$ . Элементный состав в выделенных областях приведен в табл. 2.

Видно, что в светлой области (табл. 2, обл. 1) преобладает Pd (95,99 вес. %), из которого состоит Pd-стержень (> 99,995 %). Другая область (табл. 2, обл. 2) имеет темный оттенок из-за наличия значительного количества углерода (60,10 ат. %), но помимо этого обнаружены элементы  ${}_8\text{O}$ ,  ${}_{13}\text{Al}$ ,  ${}_{19}\text{K}$ ,  ${}_{20}\text{Ca}$ ,  ${}_{26}\text{Fe}$ ,  ${}_{29}\text{Cu}$  и  ${}_{30}\text{Zn}$ , а также и тяжелый элемент  ${}_{82}\text{Pb}$  (6,93 вес. %). Из рис. 2, б видно, что все эти элементы присутствуют в спектре.

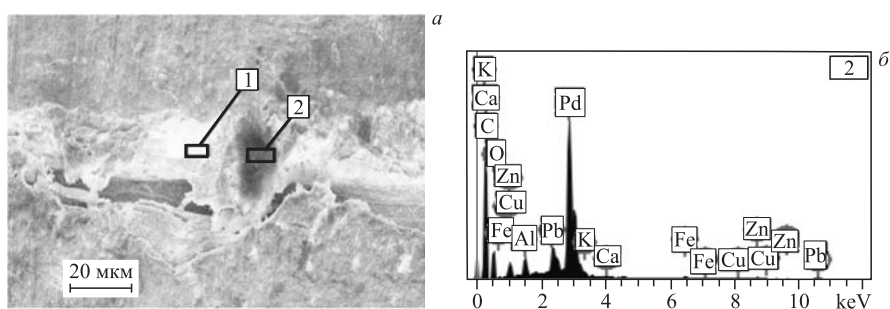


Рис. 2. СЭМ-изображение боковой поверхности Pd-стержня с двумя областями 1 и 2, где был проведен РМЗА (а), и характеристический спектр области 2 (б)

Таблица 2. Элементный состав в областях 1 и 2 на рис. 2

zN	Серия	Область 1		Область 2	
		C, вес. %	C, ат. %	C, вес. %	C, ат. %
$^6\text{C}$	K	—	—	29,06	60,10
$^8\text{O}$	K	3,57	19,54	17,10	26,55
$^{13}\text{Al}$	K	0,44	1,43	1,43	1,32
$^{19}\text{K}$	K	—	—	0,36	0,23
$^{20}\text{Ca}$	K	—	—	0,18	0,11
$^{26}\text{Fe}$	K	—	—	0,51	0,23
$^{29}\text{Cu}$	K	—	—	0,37	0,14
$^{30}\text{Zn}$	K	—	—	1,38	0,53
$^{46}\text{Pd}$	L	95,99	79,02	42,67	9,96
$^{82}\text{Pb}$	M	—	—	6,93	0,83

Для надежности был проведен РМЗА в еще одной области темного цвета, фотография которой представлена на рис. 3. В табл. 3 представлен элементный состав, измеренный РМЗА (в области 3 с площадью  $12,29 \times 9,65 \text{ мкм}^2$ ). Как видно из табл. 3, при элементном анализе обнаружены следующие химические элементы:  $^6\text{C}$ ,  $^7\text{N}$ ,  $^8\text{O}$ ,  $^{12}\text{Mg}$ ,  $^{13}\text{Al}$ ,  $^{14}\text{Si}$ ,  $^{15}\text{P}$ ,  $^{16}\text{S}$ ,  $^{17}\text{Cl}$ ,  $^{19}\text{K}$ ,  $^{20}\text{Ca}$ ,  $^{25}\text{Cr}$ ,  $^{26}\text{Fe}$ ,  $^{30}\text{Zn}$ ,  $^{46}\text{Pd}$ . Отметим значительное количество азота ( $^7\text{N}$ ) в связанном состоянии — 7,21 вес.%, или 8,26 ат.%. При этом другие летучие элементы типа инертных газов:  $^{10}\text{Ne}\uparrow$  и  $^{18}\text{Ar}\uparrow$  зарегистрированы быть не могут, хотя они также могли образовываться в процессе протекающих ядерных реакций. Концентрация основного и единственного элемента Pd-стержня составляет всего лишь 11,01 вес.%, или 1,66 ат.%.  
 На рис. 4 представлена более узкая трещина на боковой поверхности Pd-стержня, изображение которой получено в отраженных электронах (рис. 4, а), а также показан и характеристический спектр, измеренный в области 4 (рис. 4, б). Видно, что вдоль трещины присутствует светлая полоса, в которой должны быть элементы с большим зарядом ядра, чем палладий. Проведенный РМЗА в выделенной области 4 на рис. 4 это однозначно подтвердил. В табл. 4 представлен элементный состав в промеренной области 4 с площадью  $14,06 \times 11,038 \text{ мкм}$ .

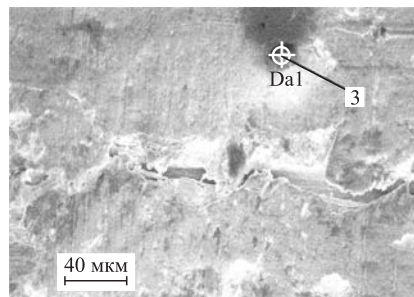


Рис. 3. СЭМ-изображение боковой поверхности Pd-стержня с областью 3, где был проведен РМЗА

Таблица 3. Элементный состав, измеренный РМЗА в области 3 рис.3

zN	Серия	C, вес. %	C, ат. %
6C	K	44,74	59,76
7N	K	7,21	8,26
8O	K	26,20	26,27
12Mg	K	0,11	0,07
13Al	K	1,13	0,67
14Si	K	0,14	0,08
15P	K	0,16	0,08
16S	K	1,36	0,68
17Cl	K	1,32	0,60
19K	K	0,49	0,20
20Ca	K	0,48	0,19
25Cr	K	0,18	0,06
26Fe	K	1,80	0,52
30Zn	K	3,67	0,90
46Pd	L	11,01	1,66

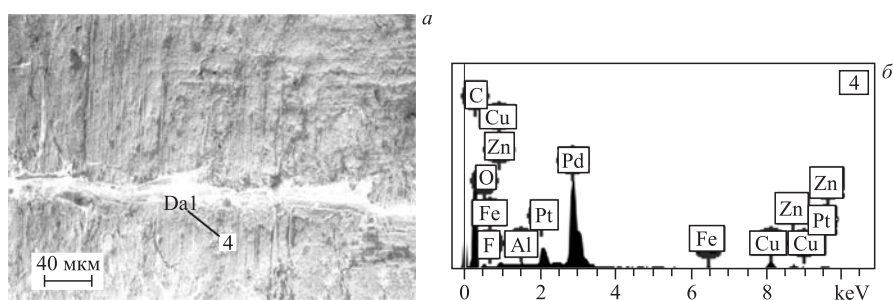


Рис. 4. СЭМ-изображение боковой поверхности Pd-стержня с выделенной площадью, где был проведен РМЗА (а), и спектр характеристического излучения (б)

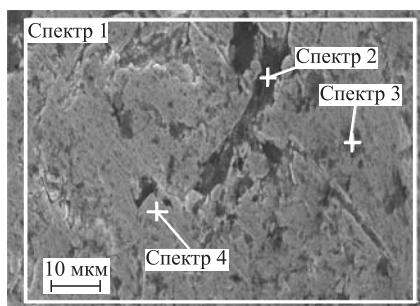
Таблица 4. Элементный состав, измеренный РМЗА в области 4 рис. 4

zN	Серия	C, вес. %	C, ат. %
6C	K	31,78	76,85
8O	K	1,70	3,09
9F	K	0,70	1,07
13Al	K	0,41	0,44
26Fe	K	0,33	0,17
29Cu	K	6,18	2,82
30Zn	K	3,87	1,72
46Pd	L	45,44	12,41
78Pt	M	9,59	1,43



Длина полосы с присутствием платины на рис. 4 — более 240 мкм при ширине от 10 до 30 мкм. Видно, что в этой полосе присутствует тяжелый элемент  $^{78}\text{Pt}$ , а помимо платины также медь (6,18 вес. %) и цинк (3,87 вес. %). Из всех ранее выполненных исследований исходных материалов, внутренние поверхности которых имеют контакт с плотными газами в ДНРС или ННРС (см. [2–9]), обнаружено, что присутствуют в значительных количествах  $^{78}\text{Pt}$  (табл. 4) и  $^{82}\text{Pb}$  (табл. 2). Видимо, их образование обусловлено ядерными реакциями при воздействии  $\gamma$ -квантов с энергиями порядка 10 МэВ и более.

**2.2. Исследование торцевой поверхности Pd-стержня, ближней к входному окну из Ве-бронзы, т. е. место входа  $\gamma$ -квантов.** На рис. 5 представлено изображение сильно деформированной поверхности торца Pd-стержня с отмеченными тремя точками (спектры 2, 3 и 4) и областью (спектр 1), в которых был проведен РМЗА. Спектр 1 соответствует сканированию электронным пучком по выделенной прямоугольной площади. В табл. 5 представлен элементный состав.



Для большей достоверности измерений был проанализирован и другой участок торцевой поверхности Pd-стержня, представленный на рис. 6. Элементный анализ в области 1 (спектр 1) и точках 2, 3 (спектры 2, 3) представлен в табл. 6.

Рис. 5. СЭМ-изображение торцевой поверхности Pd-стержня с точками 2–4 и областью 1, где был проведен РМЗА

**Таблица 5.** Элементный состав, измеренный в отмеченных на рис. 5 области 1 и точках 2–4

zN	Спектр 1		Спектр 2		Спектр 3		Спектр 4	
	C, вес. %	C, ат. %	C, вес. %	C, ат. %	C, вес. %	C, ат. %	C, вес. %	C, ат. %
$^6\text{C}$	5,54	26,12	15,74	44,60	9,12	34,21	—	—
$^8\text{O}$	5,65	20,01	14,83	31,54	5,95	16,76	—	—
$^{12}\text{Mg}$	—	—	0,22	0,30	—	—	0,15	0,63
$^{13}\text{Al}$	0,21	0,44	0,30	0,37	—	—	0,30	1,16
$^{14}\text{Si}$	3,08	6,21	0,88	1,07	10,09	16,17	—	—
$^{20}\text{Ca}$	—	—	0,31	0,26	—	—	—	—
$^{26}\text{Fe}$	0,42	0,43	0,41	0,25	0,63	0,51	—	—
$^{29}\text{Cu}$	4,03	3,59	1,07	0,57	2,79	1,98	0,42	0,68
$^{30}\text{Zn}$	—	—	—	—	0,55	0,38	—	—
$^{31}\text{Ga}$	0,11	0,09	—	—	—	—	—	—
$^{46}\text{Pd}$	80,96	43,11	66,32	21,21	70,86	29,99	99,26	97,71

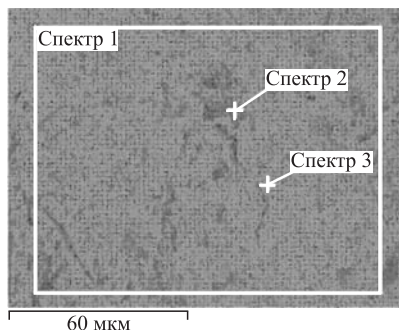


Рис. 6. СЭМ-изображение торцевой поверхности Pd-стержня с выделенными областью 1 и точками 2 и 3, где был проведен РМЗА

Таблица 6. Элементный состав, измеренный в отмеченных на рис.6 области 1 и точках 2 и 3

zN	Спектр 1		Спектр 2		Спектр 3	
	C, вес. %	C, ат. %	C, вес. %	C, ат. %	C, вес. %	C, ат. %
<sup>6</sup> C	5,79	26,49	8,94	33,10	—	—
<sup>8</sup> O	6,03	20,71	8,66	24,07	—	—
<sup>12</sup> Mg	—	—	—	—	0,18	0,79
<sup>13</sup> Al	0,20	0,41	0,20	0,32	0,28	1,07
<sup>14</sup> Si	3,42	6,69	5,87	9,30	—	—
<sup>20</sup> Ca	—	—	0,41	0,46	—	—
<sup>26</sup> Fe	0,43	0,42	—	—	—	—
<sup>29</sup> Cu	5,29	4,57	3,53	2,47	1,48	2,42
<sup>31</sup> Ga	0,01	0,01	0,11	0,07	0,05	0,08
<sup>46</sup> Pd	78,83	40,70	72,27	30,21	98,00	95,64

Спектр 1 соответствует сканированию электронным пучком по выделенной прямоугольной площади.

Из результатов, приведенных в табл.5 и 6, можно сделать вывод, что на гладких участках торцевой поверхности, несмотря на присутствие примесей Mg, Al и Cu, концентрации Pd достаточно высоки: 99,26 вес.%, или 97,71 ат.% (табл.5, спектр 4) и 98,00 вес.%, или 95,64 ат.% (табл.6, спектр 3). На более темных участках торцевой поверхности присутствует более широкий спектр химических элементов <sup>6</sup>C, <sup>8</sup>O, <sup>12</sup>Mg, <sup>13</sup>Al, <sup>14</sup>Si, <sup>20</sup>Ca, <sup>26</sup>Fe, <sup>29</sup>Cu, <sup>30</sup>Zn и <sup>31</sup>Ga. Причем концентрации кремния и меди оказываются весьма значительными: до 10,07 вес.%, или 16,17 ат.% и 5,29 вес.%, или 4,57 ат.% соответственно.

**2.3. Исследование торцевой поверхности Pd-стержня, ближней к сборнику продуктов ядерно-химических реакций.** На рис.7–9 представлены три сильно деформированных участка торцевой поверхности Pd-стержня с

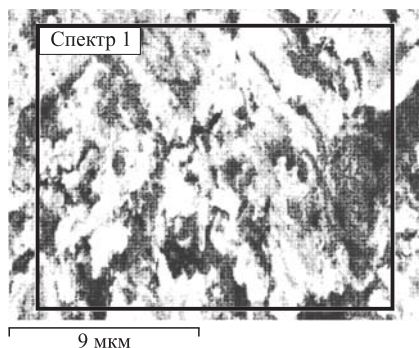


Рис. 7. СЭМ-изображение торцевой поверхности Pd-стержня с выделенной областью, в которой был проведен РМЗА. Измерение РМЗА проведено на выделенной площади  $230 \text{ мкм}^2$  ( $16,9 \times 13,6 \text{ мкм}$ )

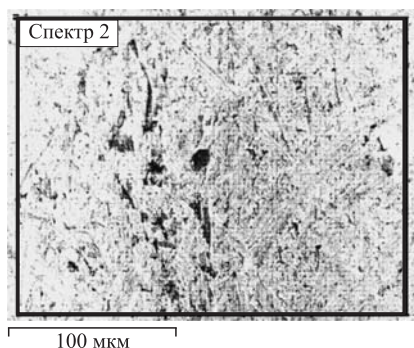


Рис. 8. СЭМ-изображение торцевой поверхности Pd-стержня с выделенной областью, в которой был проведен РМЗА. Измерение РМЗА проведено на выделенной площади  $4,0 \cdot 10^4 \text{ мкм}^2$  ( $225 \times 178 \text{ мкм}$ )

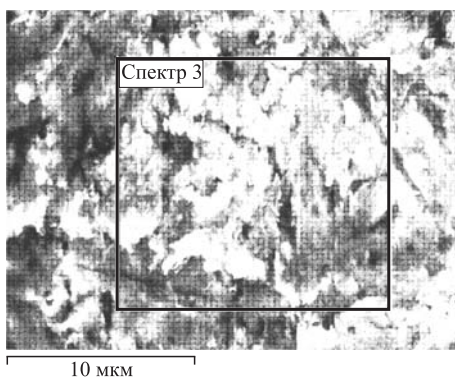


Рис. 9. СЭМ-изображение торцевой поверхности Pd-стержня с выделенной областью, в которой был проведен РМЗА. Измерение РМЗА проведено на площади  $195 \text{ мкм}^2$  ( $14,4 \times 13,6 \text{ мкм}$ )

измерением элементного состава при возбуждении рентгеновского характеристического излучения (ХСРИ) при сканировании электронного пучка по выделенным областям 1, 2 и 3. В табл. 7 приведены элементные составы, полученные методом РМЗА из выделенных областей.

Как видно, атомная концентрация палладия с обратной стороны Pd-стержня уменьшилась до 35,54–41,64 ат. %, в то время как с другой стороны в отдельных местах достигала значения 97,71 ат. % (см. табл. 5, спектр 4) и 95,64 ат. % (см. табл. 6, спектр 3). Даже при РМЗА с большой площади торцевой поверхности Pd-стержня (рис. 8, спектр 2), примерно равной

Таблица 7. Элементный состав, измеренный в отмеченных на рис. 7–9 областях 1, 2 и 3

zN	Рис. 7, спектр 1		Рис. 8, спектр 2		Рис. 9, спектр 3	
	C, вес. %	C, ат. %	C, вес. %	C, ат. %	C, вес. %	C, ат. %
<sup>6</sup> C	8,05	34,02	7,78	31,52	6,53	30,54
<sup>8</sup> O	5,09	16,16	7,63	23,20	5,31	18,66
<sup>13</sup> Al	0,27	0,50	0,24	0,43	0,23	0,48
<sup>14</sup> Si	4,13	7,46	3,64	6,31	2,24	4,48
<sup>29</sup> Cu	7,92	6,33	5,25	4,02	4,78	4,22
<sup>31</sup> Ga	—	—	0,01	0,01	—	—
<sup>46</sup> Pd	74,54	35,54	75,45	34,51	78,89	41,64

$4,0 \cdot 10^4$  мкм<sup>2</sup>, концентрации кремния (3,64 вес. %, или 6,31 ат. %) и меди (5,25 вес. %, или 4,02 ат. %) вместе с углеродом (7,78 вес. %, или 31,52 ат. %) и кислородом (7,63 вес. %, или 23,20 ат. %) достаточно высоки.

**2.4. Исследование поверхности и боковых сторон латунного сборника продуктов ядерных и химических реакций.** На рис. 10, а, б приведены внешний вид латунного сборника продуктов ядерных и химических реакций и

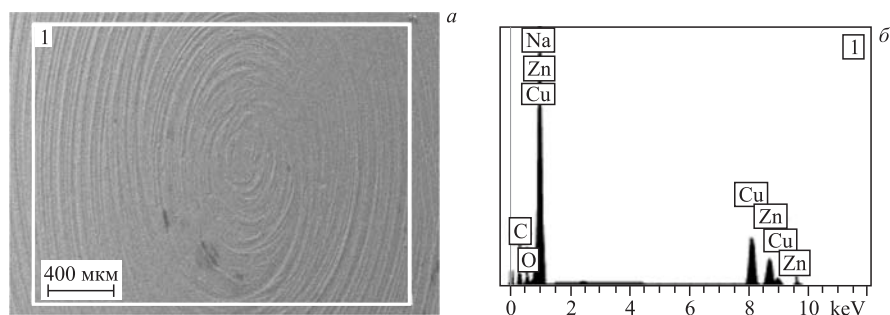


Рис. 10. СЭМ-изображение поверхности латунного сборника из выделенной области 1 на рис. 10, в которой был проведен РМЗА (а), и спектр ХСРП (б)

Таблица 8. Элементный состав из выделенной области 1 на рис. 10. Отношение  $Cu$  (ат. %)/ $Zn$  (ат. %) = 1,50

zN	Серия	C, вес. %	C, ат. %
<sup>6</sup> C	K	16,95	48,43
<sup>8</sup> O	K	3,05	6,54
<sup>11</sup> Na	K	2,42	3,61
<sup>29</sup> Cu	K	45,97	24,83
<sup>30</sup> Zn	K	31,61	16,59

область (1), в которой проведен РМЗА (а), а также спектр ХСРИ (б). В табл. 8 приведен элементный состав, измеренный РМЗА на рис. 10.

Из табл. 8 видно, что отношение концентрации в атомных процентах меди и цинка равно 1.50. Тогда, вводя относительные концентрации меди

$$\bar{C}_{\text{Cu}} = \frac{100 \% \cdot C_{\text{Cu}} (\text{ат. \%})}{[C_{\text{Cu}} (\text{ат. \%}) + C_{\text{Zn}} (\text{ат. \%})]}$$

и цинка

$$\bar{C}_{\text{Zn}} = \frac{100 \% \cdot C_{\text{Zn}} (\text{ат. \%})}{[C_{\text{Cu}} (\text{ат. \%}) + C_{\text{Zn}} (\text{ат. \%})]},$$

для их отношения находим  $\bar{C}_{\text{Cu}} : \bar{C}_{\text{Zn}} = 59,95 \text{ ат. \%} : 40,05 \text{ ат. \%}$ . Это отношение практически идеально совпадает с паспортными данными на латунь — 60 ат. % : 40 ат. %. На поверхности латуни много углерода, 48,43 ат. %, и присутствует также натрий, 3,61 ат. %.

На рис. 11 представлено изображение нескольких структур на поверхности латунного сборника с указанием области РМЗА (а) и спектр ХСРИ, измеренный с площади 3,2 мкм (2,0 × 1,6 мкм) вблизи указанной точки 2. В табл. 9 приведен элементный состав, измеренный РМЗА в области 2 на рис. 11.

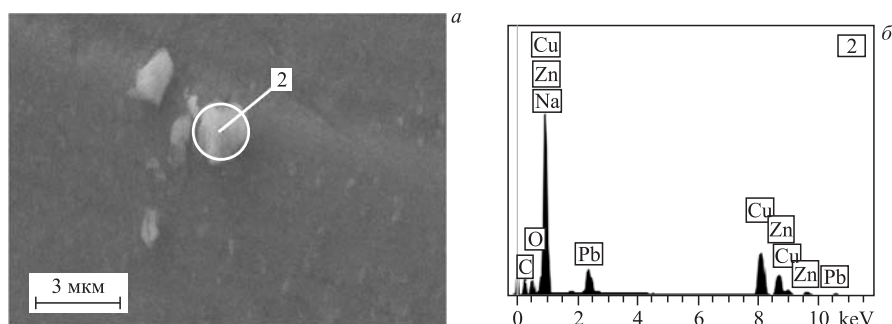


Рис. 11. СЭМ-изображение поверхности латунного сборника с выделенной областью, в которой был проведен РМЗА (а), и спектр ХСРИ (б)

Таблица 9. Элементный состав из выделенной области 2 на рис.11. Отношение  $\text{Cu (ат. \%)/Zn (ат. \%)} = 1,65$

ZN	Серия	C, вес. %	C, ат. %
<sup>6</sup> C	K	15,07	45,36
<sup>8</sup> O	K	5,60	12,66
<sup>11</sup> Na	K	1,57	2,47
<sup>29</sup> Cu	K	41,13	23,40
<sup>30</sup> Zn	K	25,68	14,20
<sup>82</sup> Pb	M	10,96	1,91

Как видно из табл. 9 и из ХСРИ-спектра, в котором присутствуют спектральные линии для свинца, обнаруженные частицы содержат до 10,96 вес. %, или 1,91 ат. % свинца, а также присутствует много углерода (45,36 ат. %), кислорода (12,66 ат. %), натрия (2,47 ат. %). Отношение концентраций меди и цинка увеличилось до 1,65, а отношение их относительных концентраций стало 62,23 ат. % : 37,77 ат. %.

На рис. 12 представлено изображение одной структуры на поверхности латунного сборника с указанием мелкой светлой частицы РМЗА (а) и спектр ХСРИ, измеренный в выделенной области 3 (б). В табл. 10 приведен элементный состав, измеренный РМЗА на рис. 12, а.

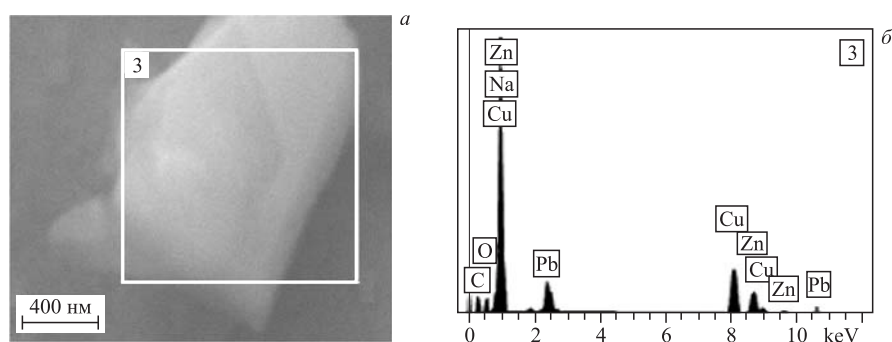


Рис. 12. СЭМ-изображение поверхности латунного сборника с выделенной областью, в которой был проведен РМЗА (а), и спектр ХСРИ (б)

Таблица 10. Элементный состав из выделенной области 3 на рис. 12. Отношение  $Cu$  (ат. %)/ $Zn$  (ат. %) = 1,65

Элемент	Серия	$C$ , вес. %	$C$ , ат. %
C	K	16,90	48,72
O	K	5,66	12,25
Na	K	1,84	2,76
Cu	K	39,12	21,31
Zn	K	24,43	12,94
Pb	M	12,05	2,01

Отношение атомных концентраций меди и цинка такое же, как в табл. 9, а именно 1.65, и отношение их относительных концентраций не изменилось — 62,2 ат. % : 37,8 ат. %. Концентрация свинца несколько увеличилась — 12,05 вес. %.

На рис. 13 представлено изображение еще одной структуры на поверхности латунного сборника с указанием области РМЗА (а) и спектр ХСРИ, измеренный в выделенной области 4 (б). В табл. 11 приведен элементный состав, измеренный РМЗА на рис. 13.

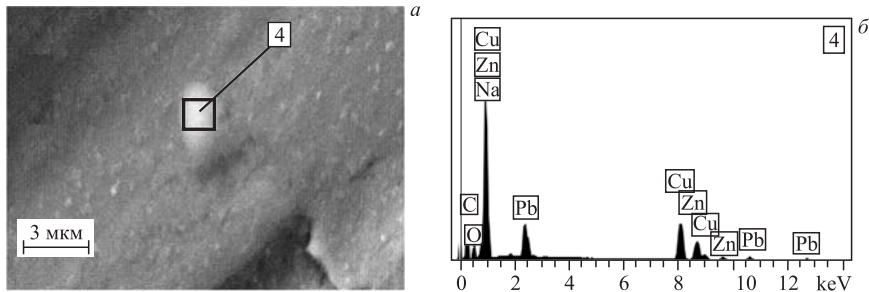


Рис. 13. СЭМ-изображение поверхности латунного сборника с выделенной областью, в которой был проведен РМЗА (а), и спектр ХСРП (б)

Таблица 11. Элементный состав из выделенной области 4 на рис. 13. Отношение  $Cu$  (ат. %)/ $Zn$  (ат. %) = 1,63

Элемент	Серия	C, вес. %	C, ат. %
C	K	24,91	61,17
O	K	5,47	10,09
Na	K	1,36	1,74
Cu	K	33,41	15,51
Zn	K	21,14	9,54
Pb	M	13,71	1,95

Видно, что отношение атомных концентраций меди и цинка, а именно 1,63, почти не изменилось, и отношение относительных концентраций не изменилось — 61,92 ат. % : 38,08 ат. %. Концентрация свинца несколько возросла — 13,71 вес. %.

Таблица 12. Отношения относительных концентраций  $Cu$  и  $Zn$ , измеренные на рис. 10–13

Параметр	Рис. 10, табл. 8	Рис. 11, табл. 9	Рис. 12, табл. 10	Рис. 13, табл. 11
$Cu:Zn$	59,95 % : 40,05 %	62,23 % : 37,77 %	62,22 % : 37,78 %	61,92 % : 38,08 %

В табл. 12 представлены отношения относительных концентраций основных элементов латунного сборника  $Cu$  и  $Zn$  с четырех рисунков (рис. 10–13) и соответствующих им табл. 8–11, которые показывают, что измеренные составы близки и практически соответствуют составу исходной латуни 60 ат. % : 40 ат. %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Анализируя результаты СЭМ-микроскопии и элементного анализа поверхностей и Pd-стержня сборника, можно сделать вывод, что при облучении

насыщенного водородом палладия в атмосфере плотного водорода (камера облучения ННПС с давлением 2,5 кбар) обе торцевых и боковая поверхности Pd-стержня значительно видоизменились и образовался целый спектр химических элементов. При этом время облучения тормозными  $\gamma$ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ составило  $2,5 \cdot 10^4$  с при токе электронного пучка ускорителя МТ-25 от 2,5 до 3,5 мкА. Если вначале в исходном Pd-стержне концентрация примесей составляла менее 50 ppm, то в процессе облучения атомный процент палладия со стороны выхода  $\gamma$ -квантов изменился до 74,54 вес. % (или 35,54 ат. %) – 78,89 вес. % (или 41,64 ат. %). Поверхность палладия покрылась трещинами и кратерами, в которых химический состав изменился сильнее всего. Измерения, выполненные на Pd-стержне, позволили *надежно установить* наличие следующих легких, по сравнению с палладием, элементов, концентрация которых в различных местах также сильно различается:  $^6\text{C}$ ,  $^7\text{N}$ ,  $^8\text{O}$ ,  $^9\text{F}$ ,  $^{11}\text{Na}$ ,  $^{12}\text{Mg}$ ,  $^{13}\text{Al}$ ,  $^{14}\text{Si}$ ,  $^{15}\text{P}$ ,  $^{16}\text{S}$ ,  $^{17}\text{Cl}$ ,  $^{19}\text{K}$ ,  $^{20}\text{Ca}$ ,  $^{25}\text{Cr}$ ,  $^{26}\text{Fe}$ ,  $^{29}\text{Cu}$ ,  $^{30}\text{Zn}$ ,  $^{31}\text{Ga}$ . В этом ряду отсутствуют летучие примеси типа инертных газов:  $^{10}\text{Ne}$  и  $^{18}\text{Ar}$  и ряда металлов. Заметим, что азота, который мог находиться только в химически связанном состоянии в промеренном участке оказалось достаточно много: 7,81 вес. %, или 8,26 ат. % (см. рис. 3, табл. 3). Помимо этого в трещинах и разломах на боковой поверхности Pd-стержня обнаружен свинец  $^{82}\text{Pb}$  (см. рис. 1, табл. 1: 4,21 вес. % (или 0,81 ат. %) и рис. 2, табл. 2: 6,93 вес. % (или 0,83 ат. %)), а также платина  $^{78}\text{Pt}$  (рис. 4, табл. 4: 9,53 вес. %, или 1,43 ат. %). Отметим, что платина «растеклась» по поверхности вдоль трещины в виде светлой полосы с длиной более 240 мкм при ширине от 10 до 30 мкм, что отчетливо видно в СЭМ-исследованиях в отраженных электронах (см. рис. 4). На торцевой поверхности в месте выхода  $\gamma$ -квантов много меди  $^{29}\text{Cu}$  (см. рис. 5 (табл. 5), рис. 6 (табл. 6): 4,03 вес. % и 5,29 вес. %, а также рис. 7–9 (табл. 7): 7,92 вес. %, 5,25 вес. % и 4,78 вес. % соответственно).

На поверхности латунного сборника продуктов ядерных и химических реакций присутствует множество мелких «светлых» частиц, но встречаются и более крупные светлые частицы из химических элементов с большими зарядами ядер, чем элементы сборника  $^{29}\text{Cu}$  и  $^{30}\text{Zn}$ . Основными элементами, обнаруженными на сборнике, являются  $^6\text{C}$ ,  $^8\text{O}$ ,  $^{11}\text{Na}$ ,  $^{29}\text{Cu}$  и  $^{30}\text{Zn}$  (см. рис. 10 и табл. 8). Из сводной табл. 14 видно, что РМЗА достаточно хорошо позволяет промерить соотношение меди и цинка в латуни. Это соотношение близко к соотношению для исходной латуни, а именно: 60 ат. % : 40 ат. %. Из элементного анализа более крупных частиц на поверхности латунного сборника на рис. 11 (табл. 9), рис. 12 (табл. 10) и рис. 13 (табл. 11)) можно сделать вывод, что более светлые частицы содержат свинец  $^{82}\text{Pb}$ : 10,96 вес. % (или 1,91 ат. %), 12,95 вес. % (или 2,01 ат. %) и 13,71 вес. % (или 1,95 ат. %) соответственно. Ввиду малости частиц при РМЗА существенный вклад дает поверхность под частицей, т. е. латунь.



Следует отметить, что при той же настройке электронного пучка ускорителя электронов МТ-25 и при тех же относительно низких значениях тока пучка 2,5–3,5 мкА помимо облучения ННРС при примерно той же длительности облучения было выполнено облучение ДНРС с Pd-стержнем и дейтерием при давлении 3,5 кбар. Исследования показали, что в целом имеется значительное сходство в изменении элементного состава и разрушении поверхности Pd-стержня, но при использовании ННРС с водородом и ДНРС с дейтерием эффекты с дейтерием существенно больше.

В работах [2–6], в которых приведены результаты по изучению структуры поверхностей и химических составов синтезированной структуры и латунного сборника (см. [2], рис. 1), а также всех остальных элементов, входивших в ДНРС, а именно: сильно деструктированного Pd-стержня, манганиновой разделительной фольги, входного окна из бериллиевой бронзы и внутренних стенок латунной камеры, присутствовал в значительных количествах титан ( ${}_{22}\text{Ti}$ ) и более тяжелые элементы вплоть до свинца. В работах [7, 8] при облучении ДНРС при пониженном давлении ( $\approx 1,2$  кбар) образовался в столь же значительных количествах свинец  ${}_{82}\text{Pb}$  при образовании также платины  ${}_{78}\text{Pt}$  и золота  ${}_{79}\text{Au}$ , можно сделать следующие предварительные выводы:

1. Процесс деления ядер в основном происходит в насыщенном дейтериием/водородом палладии или другом также насыщенном до высокой степени металле или сплаве.

Об этом свидетельствует сильно измененный палладий, из которого во все стороны происходят выбросы, которые в ряде случаев застывают в виде структур типа «протуберанцев», состоящих в основном из образовавшихся продуктов деления, то есть химических элементов легче палладия или другого металла.

2. Процесс деления или слияния ядер носит флуктуационный характер по объему металла/сплава с высокой концентрацией дейтерия/водорода, т. е. реакция происходит там, где создаются для этого условия, скорее всего, возникает что-то вроде локальной цепной реакции.

Об этом свидетельствуют неравномерное изменение состава палладия или другого металла/сплава и выбросы в виде застывших протуберанцев, направленных от поверхности палладия в произвольных местах.

3. В местах образования трещин или кратеров из-за высокой температуры в них помимо реакций деления палладия или другого металла проходят реакции полного или неполного слияния ядер (т. е. образование квазиядер или молекулярно-ядерных систем) с образованием химических «элементов», более тяжелых, чем палладий или другой металл, в ДНРС или ННРС.

Этот вывод следует из того факта, что для реакций полного слияния ядер не хватает энергии.

4. Процесс деления или слияния ядер и образования химических элементов ( ${}_{22}\text{Ti}$  или  ${}_{82}\text{Pb}$ , возможно, и более тяжелых) обусловлен теми реак-

циями деления, которые возможны в месте, где реакция флуктуационно начинается.

5. Процесс деления или слияния носит пороговый характер по потоку  $\gamma$ -квантов, величине давления дейтерия или водорода (далее «рабочего газа») в ДНРС или ННРС соответственно.

6. Видимо, при увеличении потока  $\gamma$ -квантов реакция может протекать и во всем образце металла, насыщенного «рабочим» газом.

7. Возможно, что в процессах деления ядер реализуется принцип минимума свободной энергии, когда большая часть энергии деления ядер в насыщенном дейтерием/водородом металле идет на деление или «слияние» ядер!

8. В результате реакций деления образуются, преимущественно, короткоживущие продукты деления, что позволяет перерабатывать радиоактивные отходы ядерной энергетики с получением из процесса дополнительной энергии.

9. В реакциях деления ядер средних масс образуются тяжелые изотопы химических элементов, что также может иметь область применения.

10. Применение водорода вместо дейтерия позволит значительно снизить внешние затраты на работу дейтерированного реактора деления (ДРД) по сравнению с работой гидрированного реактора деления (ГРД) для получения энергии [13].

Применимость данного подхода для получения энергии вызывает естественные вопросы. Но в связи с тем, что водород значительно дешевле дейтерия, которого в естественной смеси всего 0,015 %, процесс, несмотря на значительно меньшие эффекты, также представляет интерес как фундаментальный теоретический, так и научно-прикладной.

С нашей точки зрения, полученные эффекты обусловлены нормальными ядерными реакциями в твердом теле и к так называемому холодному термоядерному синтезу никакого отношения не имеют.

## **Приложение ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ**

В работах [2–13] представлены результаты по воздействию  $\gamma$ -квантов на различные чистые металлы, такие как Pd (99,995 %), Re (99,99 %), Al (99,2 %), Cu (99,3 %), V (99,95 %), сплавы  $\gamma\text{Mn}_2$  (99,2 %), нержавеющая сталь (X18H10), при давлении молекулярного дейтерия от 1,2 до 3,5 кбар, а в работах [4, 6–8, 14] представлен феноменологический подход с ядерными реакциями, которые объясняют наблюдаемые эффекты по изменению структуры поверхности и объемных свойств образцов и образование новых легких (более понятные процессы) и более тяжелых (только одни возможные предположения объяснений, которые требуют детальных исследований) химических

элементов, отсутствовавших в исходных изученных образцах. Основной реакцией в предложенном модельном подходе являлась реакция фоторасщепления дейтрона на протоны и нейтроны  $\gamma(d, p)n$  с образованием протонов и нейтронов с энергиями  $E_{n,p} \approx 0,5[E_\gamma - W]$ , где  $E_\gamma$  — энергия тормозного  $\gamma$ -кванта, а  $W = 2,22$  МэВ — энергия связи дейтрона. При этом за счет процессов упругого рассеяния энергичных («горячих») протонов с атомными сечениями и протекали остальные процессы.

Основной целью выполненной работы являлось выяснение возможности получения аналогичных изменений в насыщенном водородом палладию, находящемся в атмосфере плотного газообразного молекулярного водорода, схожих с изменениями в экспериментах, выполненных в плотном газообразном дейтерии [2–9, 14]. Ясно, что замена дейтерия на водород практически исключает реакцию фоторасщепления дейтрона.

Рассмотрим основные процессы, которые происходят в насыщенном водородом палладию в атмосфере молекулярного водорода (в нашем случае при давлении 2,5 кбар):

1. Диссоциацию молекул водорода:



2. Рассеяние  $\gamma$ -квантов с длиной волны

$$\lambda_\gamma \equiv \frac{c_0 \cdot h}{E_\gamma} = \frac{1,291992}{E_\gamma (\text{МэВ})} \cdot 10^{-10} \text{ см} \quad (2)$$

на атомах водорода ( $M_{\text{H}}$ ) или молекулах водорода ( $M_{\text{H}_2}$ ) с максимально переданными им энергиями:

$$T_{\text{H, H}_2}^{\text{max}} = E_\gamma \left[ 1 + \frac{M_{\text{H, H}_2} c^2}{2E_\gamma} \right]^{-1}, \quad (3)$$

откуда для  $E_\gamma = 10$  МэВ для атомов водорода или молекул водорода находим максимальные переданные энергии:  $T_{\text{H}}^{\text{max}} = 208,6$  кэВ и  $T_{\text{H}_2}^{\text{max}} = 105,4$  кэВ соответственно.

3. Взаимодействие  $\gamma$ -квантов с электронами и ядрами в твердом теле.

В области энергий до 10 МэВ наиболее существенными процессами являются фотоэффект, эффект Комптона и образование электрон-позитронных пар. При энергии гамма-квантов больше 10 МэВ, превышающей порог фотоядерных реакций, в результате взаимодействия фотонов с ядрами становятся возможны реакции типа  $(\gamma, n)$ ,  $(\gamma, p)$ ,  $(\gamma, f)$  [1]. Сечения фотоядерных реакций в области энергий до 100 МэВ составляют 1% полного сечения взаимодействия  $\gamma$ -квантов с атомом. Однако фотоядерные реакции необходимо учитывать в процессах преобразования фотонного излучения в веществе, так

как вторичные заряженные частицы, такие как протоны и альфа-частицы, могут создавать высокую плотность ионизации. Сечение этих процессов для мишеней из алюминия и свинца приведено на рис. 14.

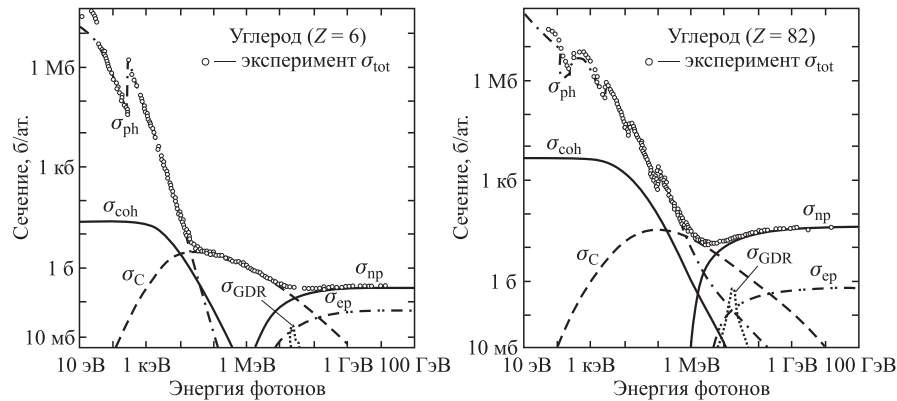


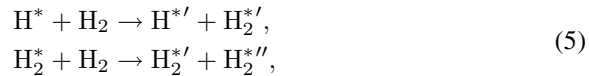
Рис. 14. Сечение взаимодействия фотонов с углеродом ( $Z = 6$ ) и свинцом ( $Z = 82$ ) при энергиях фотона от 10 эВ до 100 ГэВ.  $\sigma_{ph}$  — сечение фотоэффекта,  $\sigma_{coh}$  — сечение рэлеевского рассеяния,  $\sigma_C$  — сечение комптоновского рассеяния,  $\sigma_{np}$  — сечение рождения пары  $e^+e^-$  в поле ядра,  $\sigma_{ep}$  — сечение образования пар в поле атомных электронов,  $\sigma_{GDR}$  — сечение ядерного фотопоглощения

Сделаем небольшой экскурс в описание основных процессов при прохождении  $\gamma$ -квантов через вещество (см. [1] и цитируемую там литературу). Как видно из рис. 14, эффективное сечение фотоэффекта ( $\sigma_{ph}$ ) на атомах вещества доминирует при энергиях фотонов ниже  $\sim 0,1$  МэВ в углероде и ниже  $\sim 1$  МэВ в свинце. Вторым по величине вклада в полное сечение в этой же области энергий  $\gamma$ -квантов является когерентное рассеяние фотонов на атомах вещества (или *рэлеевское рассеяние*). Ни ионизации, ни возбуждения атомов при рэлеевском рассеянии не происходит, гамма-квант рассеивается упруго. При энергиях гамма-кванта выше  $\sim 0,1$  МэВ в веществе с малыми значениями  $Z$  и выше  $\sim 1$  МэВ в веществах с большим  $Z$  главным механизмом ослабления первичного пучка гамма-квантов становится *некогерентное рассеяние* фотонов на электронах вещества (*эффект Комптона*). Если энергия  $\gamma$ -кванта превышает удвоенную массу электрона  $2m_e c^2 = 1,022$  МэВ, становится возможным процесс образования пары, состоящей из электрона и позитрона. Сечение рождения пары в поле ядра ( $\sigma_{np}$  на рис. 14) доминирует в области высоких энергий фотонов. На рис. 14 показано также сечение образования пар в поле атомных электронов ( $\sigma_{ep}$ ).

Перечисленные выше механизмы взаимодействия  $\gamma$ -квантов с веществом не затрагивали внутренней структуры атомных ядер. При больших энергиях  $\gamma$ -квантов ( $E_\gamma > 10$  МэВ) увеличивается вероятность процесса взаимодействия фотона с ядрами вещества с возбуждением ядерных состояний. Если энергия  $\gamma$ -кванта больше энергии связи нуклона в ядре, поглощение  $\gamma$ -кванта высокой энергии будет сопровождаться вылетом нуклона из ядра. При энергиях  $\gamma$ -квантов около 20–25 МэВ для легких ядер ( $A < 40$  а. е. м.) и 13–15 МэВ для тяжелых ядер в эффективном сечении ядерного фотопоглощения наблюдается максимум, который называется *гигантским дипольным резонансом* ( $\sigma_{\text{GDR}}$  на графиках рис. 14 [1]). В области энергий  $\gamma$ -квантов, излучаемых возбужденными ядрами при переходах в основное и низшие возбужденные состояния, т. е. при  $E_\gamma$  от 10 кэВ до примерно 10 МэВ, наиболее существенны три процесса взаимодействия фотонов с веществом: комптоновское (некогерентное) рассеяние, фотоэффект и образование пар электрон–позитрон. Суммарное эффективное сечение в этой области энергий является суммой эффективных сечений отдельных процессов, участвующих в ослаблении первичного потока:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{ph}} + \sigma_{\text{C}} + \sigma_{\text{p}}. \quad (4)$$

4. Реакции упругого рассеяния «горячих» атомов и молекул водорода на «холодных» молекулах водорода с передачей им энергии («нагреванием»):



где  $\text{H}^*$ ,  $\text{H}_2^*$  — «горячие» атом и молекула водорода;  $\text{H}_2$  — «холодная» молекула водорода;  $\text{H}^{*'}$ ,  $\text{H}_2^{*'}$  — «нагретые» молекулы водорода. На рис. 15 представлено полное поперечное сечение рассеяния протонов на протонах и упругое сечение (см. [27], с. 164).

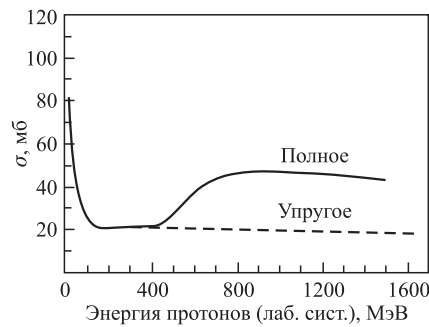
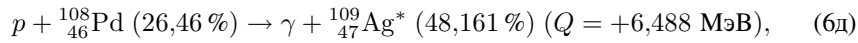
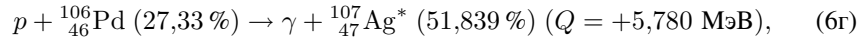
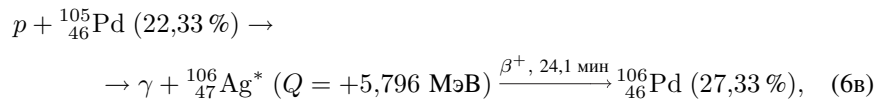
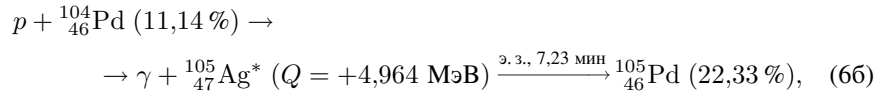
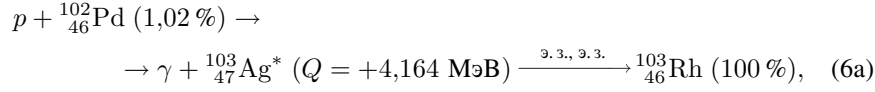


Рис. 15. Измеренное полное поперечное сечение рассеяния протонов протонами (сплошная кривая) и упругое рассеяние (штриховая кривая) в зависимости от энергии в лабораторной системе

Видно, что при малых энергиях протонов упругое сечение начинает расти.

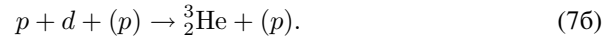
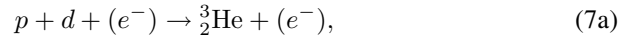
5. Подбарьерное слияние протона и ядра палладия по реакции

${}^A_Z N(p, \gamma) {}^{A+1}_{Z+1} N$ :



6. Ассоциированные ядерные реакции слияния [23, 24].

В этих реакциях возбуждение составного ядра снимается не испусканием  $\gamma$ -кванта, а передачей энергии третьей частице, которой может быть электрон или протон. В этих работах рассмотрены процессы на примере реакции:



Такие процессы, вероятность которых следует оценить, могли бы привести к образованию электронов и протонов с энергиями, сравнимыми с энергиями  $\gamma$ -квантов в реакциях (6а)–(6е). Прочитав здесь основной вывод из рассмотренного в [23, 24] подхода: «Важный аспект механизма, что если ассоциирующая частица в реакции подбарьерного слияния энергичного протона с ядром является протоном, то в каждой протонно-ассоциированной реакции ядерного захвата также образуется энергичский протон (с энергией порядка нескольких МэВ). Этот образовавшийся протон при его процессах замедления может создать (вторичные) свободные протоны в кристалле, если локализованные протоны в нем присутствуют. Вторичные свободные протоны могут принимать участие в дальнейших протонно-ассоциированных ядерных процессах захвата. Таким образом, в этом процессе вторичные протоны могут играть ту же роль, что играют вторичных нейтроны в случае ядерного деления».

А электроны и протоны с энергиями в несколько МэВ могли бы и дальше вызывать реакции с нагревом атомов и молекул водорода типа реакций (5) и приводить к реакциям (6а)–(6е), (7а), (7б), а возможно, в капельной модели ядра с передачей составному ядру большого момента, который понижает барьер деления и вызывает асимметричное деление ядер [17–19] и другие реакции (см. [16, 20–27] и реакции, приведенные в [14]).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Ишханов Б. С., Капитонов И. М.* Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1979. 215 с.
2. *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. 1–6.
3. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Chemical Composition and Structural Phase Changes of Novel Synthesized Structure and of Pd Sample under  $\gamma$ -Quanta Irradiation in Dense Deuterium Gas // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2012. V. 9, No. 8. P. 615–631; JINR Preprint E15-2012-34. Dubna, 2012. 26 p.
4. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П.* Синтез новых структур в плотном газообразном дейтерии и насыщенном дейтерием палладии при ядерных реакциях, инициированных  $\gamma$ -квантами // *Физика и химия обработки материалов.* 2012. № 5. С. 5–13; Препринт ОИЯИ Р15-2012-50. Дубна, 2012. 16 с.
5. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R., Wilczinska-Kitowska T.* Deuteron Disintegration, Thermonuclear and Nuclear Fission Reactions Induced by  $\gamma$ -Quanta in D-Saturated Palladium and Dense Deuterium Gas with Synthesis of New Structures // *J. Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques.* 2013. V. 7, No. 2. P. 239–247.
6. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Synthesis of New Structures in Dense Deuterium Gas and Deuterated Palladium under Nuclear Reactions Induced by  $\gamma$  Quanta // *Inorganic Materials: Applied Research.* 2013. V. 4, No 3. P. 5–13.
7. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П., Вилчинска-Китовска Т.* Изменения структуры поверхности и элементного состава Pd-стержня и сборника продуктов ядерных и химических реакций, облученных 10 МэВ-ными  $\gamma$ -квантами в плотном дейтерии. Препринт ОИЯИ Р15-2013-15. Дубна, 2013. 39 с.; Письма в ЭЧАЯ (в печати).
8. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П., Вилчинска-Китовска Т.* Изменения свойств поверхности и элементного состава компонентов камеры высокого давления с Pd-стержнем внутри, облученных 10 МэВ-ными  $\gamma$ -квантами в плотном дейтерии. Препринт ОИЯИ Р15-2013-20. Дубна, 2013. 32 с.; Письма в ЭЧАЯ (в печати).
9. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П.* Ядерные реакции в насыщенном дейтерием палладии и рении в атмосфере плотного дейтерия при облучении  $\gamma$ -квантами непрерывного спектра с граничной энергией 23 МэВ // *Письма в ЭЧАЯ.* 2012. № 5. С. 5–13; Препринт ОИЯИ Р15-2012-63. Дубна, 2012. 22 с.
10. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П.* Изменения поверхности, объемных свойств образцов ванадия и нержавеющей стали, облученных в плотном газообразном дейтерии  $\gamma$ -квантами с пороговой энергией 23 МэВ. Препринт ОИЯИ Р15-2012-75. Дубна, 2012. 15 с.

11. Дидык А. Ю., Вишневецкий Р. Результаты по облучению алюминия и гомогенного сплава  $\text{YMn}_2$   $\gamma$ -квантами с энергией 23 МэВ в атмосфере молекулярного дейтерия при давлении 2 кбар. Препринт ОИЯИ Р15-2013-41. Дубна, 2013. 22 с.; Письма в ЭЧАЯ. 2014 (в печати).
12. Дидык А. Ю., Вишневецкий Р. Результаты по облучению нержавеющей стали и меди  $\gamma$ -квантами с энергией 23 МэВ в атмосфере молекулярного дейтерия при давлении 2 кбар. Препринт ОИЯИ Р15-2013-42. Дубна, 2013. 28 с.; Письма в ЭЧАЯ. 2014 (в печати).
13. Дидык А. Ю., Вишневецкий Р., Вилчинска-Китовска Т. Устройство для получения энергии. Патент на полезную модель. № 122197 от 21 июня 2012 г.
14. Didyk A. Yu., Wiśniewski R. Phenomenological Nuclear-Reaction Description in Deuterium-Saturated Palladium and Synthesized Structure in Dense Deuterium Gas under  $\gamma$ -Quanta Irradiation // Part. Nucl., Lett. 2013. V. 10, No. 3(180). P. 437–457; JINR Preprint E15-2012-35. Dubna, 2012. 25 p.
15. Oppenheimer J. R., Phillips M. Note for the Transmission Functions for Deuteron // Phys. Rev. 1935. V. 48, No. 15. P. 500–502.
16. Мухин К. Н. Экспериментальная ядерная физика. Т. 1. Физика атомного ядра. М.: Энергоатомиздат, 1983. 616 с. (590–593 с. — термояд и циклы Бете).
17. Moretto Luciano G. Statistical Emission of Large Fragments: A General Theoretical Approach // Nucl. Phys. A. 1975. V. 247. P. 211–230.
18. Sierk A. J. Mass-Asymmetric Fission of Light Nuclei // Phys. Rev. 1985. V. 55, No. 6. P. 582–583.
19. Sierk A. J. Macroscopic Model of Rotating Nuclei // Phys. Rev. C. 1986. V. 33, No. 6. P. 2039–2052.
20. Шилов В. М. Подбарьерное слияние сферических ядер среднего атомного номера // ЯФ. 2012. Т. 75, № 4. С. 485–490.
21. Тараканов А. В., Шилов В. М., Шмидт Р. Квазиклассическое описание слияния тяжелых ядер при околобарьерных энергиях // ЯФ. 1991. Т. 53, № 5. С. 1285–1291.
22. Пермяков В. П., Шилов В. М. Подбарьерное слияние сложных ядер // ЭЧАЯ. 1989. Т. 20, вып. 6. С. 1396–1435.
23. Kálmán P., Keszthelyi T. Solid State Internal Conversion // Phys. Rev. C. 2004. V. 69. P. 1–3.
24. Kálmán P., Keszthelyi T. Lattice Effect in Solid State Internal Conversion // Phys. Rev. C. 2009. V. 79. P. 1–4.
25. Volkov V. V., Cherepanov E. A. Formation of Nuclear Molecules in Cluster Radioactivity. On Interpretation of the Cluster Radioactivity Mechanism // Part. Nucl., Lett. 2013. V. 10, No. 3(180). P. 347–353.
26. Волков В. В. Ядерно-физические исследования с тяжелыми ионами. Избранные работы. Дубна: ОИЯИ, 2012. С. 111–114.
27. Бете Х., Мориссон Ф. Элементарная теория ядра. М.: Изд-во иностр. лит., 1958. 356 с.

Получено 29 июля 2013 г.



Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 12.11.2013.

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

Усл. печ. л. 1,56. Уч.-изд. л. 1,88. Тираж 225 экз. Заказ № 58112.

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

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

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