

P15-2014-2

А. Ю. Дидык *, Р. Вишневецкий ^{1, **}

СИНТЕЗ МИКРОЧАСТИЦ
В МОЛЕКУЛЯРНОМ ВОДОРОДЕ
ПРИ ДАВЛЕНИИ 1 КБАР В ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТОРМОЗНЫХ γ -КВАНТОВ
С ПОРОГОВОЙ ЭНЕРГИЕЙ 10 МэВ.
ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И СТРУКТУРЫ
НА ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЯХ КОМПОНЕНТОВ
КАМЕРЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

¹ Национальный центр ядерных исследований, Отвоцк, Польша

* E-mail: didyk@jinr.ru

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

Дидык А. Ю., Вишнеvский Р.

P15-2014-2

Синтез микрочастиц в молекулярном водороде при давлении 1 кбар в ядерных реакциях под действием тормозных γ -квантов с пороговой энергией 10 МэВ. Химический состав и структуры на внутренних поверхностях компонентов камеры высокого давления

Камера высокого давления, заполненная молекулярным водородом при давлении 1 кбар, была облучена тормозными γ -квантами с энергией 10 МэВ при интенсивности пучка электронов 20–21 мкА в течение 14 ч. Послерadiационные исследования структуры и элементного состава неоднородностей на поверхности, а также двух более крупных синтезированных частиц из всех обнаруженных после облучения позволили установить наличие в них легких элементов от углерода до кальция. Помимо этого найдены и изучены множественные частицы свинца малого размера. Обнаруженные синтезированные частицы имеют сложную форму и состав. На обеих сторонах внутренних поверхностей разрезанной латунной втулки найдены тонкостенные микротрубки и другие объекты сложной формы. Выявленные аномалии обсуждаются на основе моделей реакций слияния ядер водорода и более тяжелых ядер («восходящие» реакции) и реакций деления («нисходящие» реакции) и синтеза («восходящие» реакции) в ядрах стенок камеры.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2014

Didyk A. Yu., Wiśniewski R.

P15-2014-2

Synthesis of Microparticles in Molecular Hydrogen at 1 kbar Pressure in Nuclear Reactions Induced by Braking γ -Rays of 10 MeV Threshold Energy. The Chemical Composition and Structures at the Inner Surfaces of the Pressure Chamber Components

A high-pressure chamber filled with molecular hydrogen at 1 kbar was exposed to braking γ -rays produced by 10 MeV electron beam of 20–21 μ A intensity during 14 h. Post-irradiation investigations of the structure and elemental composition of the irregularities at the surface, as well as of two largest synthesized particles among the ones registered after the irradiation, established the presence of light elements from carbon to calcium. Besides, multiple lead particles of small size were found and studied. The detected synthesized particles have a complex shape and composition. At the both sides of the inner surfaces of the cut brass sleeve, thin-walled microtubes and other objects of complex shape were found. The observed anomalies are discussed based on the models of the fusion of hydrogen nuclei and heavier nuclei («upstream» reactions) and fission reactions («downstream» reactions) and fusion reactions («upstream» reactions) of nuclei in the chamber walls.

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

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

ВВЕДЕНИЕ

Результаты исследований с использованием дейтерированной камеры высокого давления (ДНРС) образцов ряда чистых металлов Al, V, Cu, Pd, Re, а также сплавов YMn_2 и нержавеющей стали при давлениях дейтерия 1,2; 2 и 3 кбар в процессе облучения γ -квантами с энергиями 9, 10, 11 и 23 МэВ (т.е. в области ядерного гигантского дипольного резонанса [1]) представлены в [2–13]. В этих работах были обнаружены значительные изменения структуры поверхности, объемных свойств и элементного состава всех компонентов внутри ДНРС, обусловленные ядерными реакциями. Устройство на основе ДНРС для получения энергии с высоким коэффициентом полезного действия описано авторами в [14]. Детальные исследования составов всех исходных материалов, входящих в элементы внутренних конструкций ДНРС, и объектов исследования до и после воздействия γ -квантов позволили однозначно установить образование в процессе протекающих ядерных реакций как более легких элементов, т.е. с меньшим атомным номером Z (от углерода до кальция), чем Z изучаемого материала мишени («нисходящие» реакции), так и более тяжелых: ${}_{73}\text{Ta}$, ${}_{74}\text{W}$, ${}_{78}\text{Pt}$, ${}_{79}\text{Au}$ и ${}_{82}\text{Pb}$ («восходящие» ядерные реакции).

На основе установленных эмпирических закономерностей образования в результате ядерных реакций химических элементов в столь широком диапазоне Z была предложена феноменологическая модель, учитывающая, как нам казалось, большинство возможных, т.е. энергетически не запрещенных, ядерных реакций, даже тех, которые имеют предельно малые вероятности (см. [15, 16]).

Исследования (см. [3, 17]), проведенные с заменой дейтерия в ДНРС с палладиевым стержнем внутри на молекулярный водород (98,0 %) при давлении 2,5 кбар (камера ННРС) в процессе облучения γ -квантами с максимальной пороговой энергией ≈ 10 МэВ при электронном пучке интенсивностью 2–3 мкА, позволили установить, что на поверхностях конструктивных элементов ННРС (разрезанной вдоль продольной оси латунной втулки и латунного сборника продуктов ядерных и химических реакций (см. [2–5])) образуются частицы, состоящие преимущественно из свинца, и частицы, имеющие в своем составе легкие элементы от углерода до кальция. При тех же условиях были облучены и затем изучены все внутренние поверхности элементов ДНРС при давлении дейтерия 3,5 кбар. Было показано в [18], что в целом изменения элементного состава и структуры поверхностей весьма похожи, но эффекты в молекулярном дейтерии в ДНРС при давлении 3,5 кбар несколько выше, чем в молекулярном водороде в ННРС при давлении 2,5 кбар.

Цель настоящей работы — исследования возможностей протекания ядерных и физико-химических реакций под действием γ -квантов с энергиями ниже энергии гигантского дипольного резонанса [1], приводящих к измене-

ниям элементного состава и структур на внутренних поверхностях конструктивных элементов ННРС (входного окна из бериллиевой бронзы, внутренних стенок латунной втулки, марганцевой фольги и сборника продуктов ядерных реакций), а также образования частиц микроскопических размеров.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКА И ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 представлена конструкция камеры высокого давления водорода (ННРС) с основными элементами, которая использовалась в предыдущих экспериментах [2, 3–9, 17] с одним отличием — отсутствовал образец палладия. По сравнению с применением в экспериментах ДНРС [2, 3–9] и ННРС [17] в данном исследовании была использована аналогичная камера со стандартным набором компонентов за исключением образца металла (палладия), который отсутствовал.

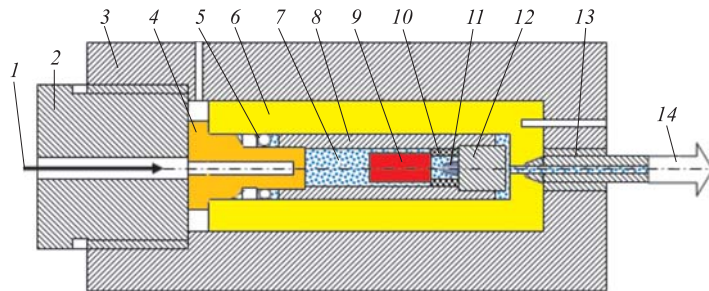


Рис. 1. Схематическое изображение ДНРС и ННРС: 1 — поток γ -квантов; 2 — резьбовое соединение с входным отверстием; 3 — корпус камеры высокого давления; 4 — «входное окно» из $\text{Cu}_{0,98}\text{Be}_{0,02}$; 5 — уплотнение для высокого давления; 6 — цилиндр камеры высокого давления из $\text{Cu}_{0,98}\text{Be}_{0,02}$;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

Камера ННРС была заполнена молекулярным водородом при давлении на момент облучения 1 кбар. Такое давление соответствует атомной концентрации водорода $n_{\text{H}} \approx 2,952 \cdot 10^{22}$ ат. $\text{H} \cdot \text{см}^{-3}$ при его плотности $\rho_{\text{H}} \approx 0,0494$ г $\cdot \text{см}^{-3}$ (см. монографию [16]). Внутри ННРС находилась только фольга из марганца, т. е. Pd-стержень отсутствовал. Облучение ННРС было проведено на ускорителе МТ-25 Лаборатории ядерных реакций в течение 14 ч (т. е. $5,04 \cdot 10^4$ с). Энергия электронного пучка составляла 10 МэВ при среднем токе 20–21 мкА. Тормозные γ -кванты были получены с использованием мишенного устройства, состоящего из тормозной мишени из вольфрама с

толщиной фольги 2,5 мм и алюминиевого поглотителя электронов толщиной 25 мм.

При вскрытии ННРС из нее высыпалось восемь мелких частиц размерами около 1 мм. При этом одна часть частиц визуально производила впечатление темных, а другая — светлых. При фотографировании со специальным приспособлением все частицы оказались прозрачными. Детальные исследования с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и рентгеновского микроэлементного зондового анализа (РМЗА) двух частиц (темной и светлой), как и синтезированные объекты на обеих внутренних поверхностях разрезанной вдоль на две половины латунной втулки (рис. 1, поз. 8), будут рассмотрены в статье [24].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Входное окно из бериллиевой бронзы (рис. 1, поз. 4). Отметим, что для большей достоверности и убедительности полученных результатов исследования СЭМ и РМЗА проводились последовательно в двух независимых

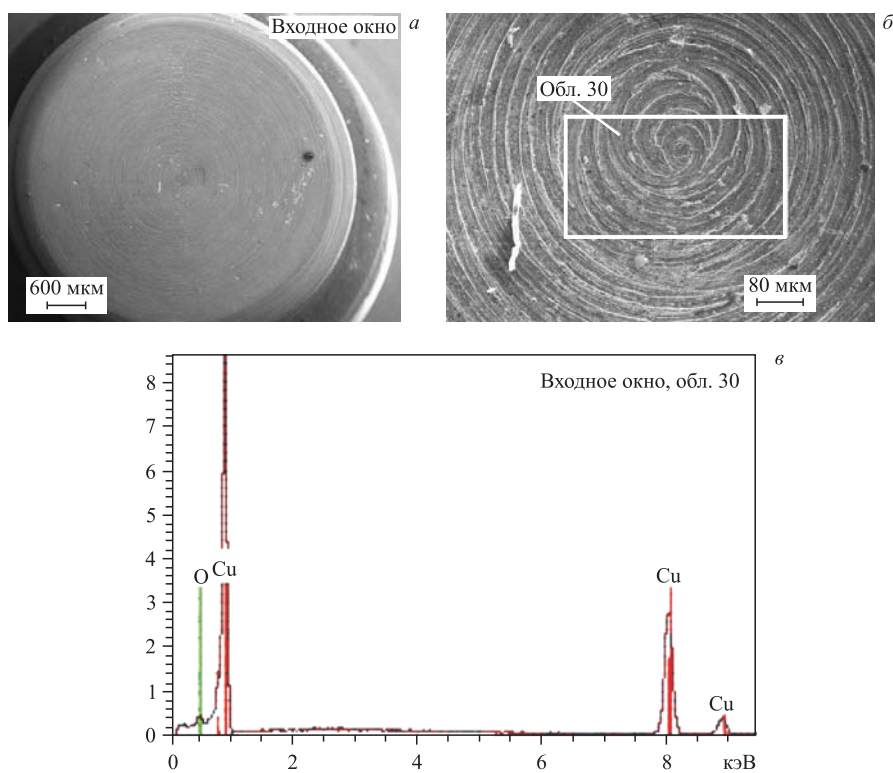


Рис. 2. СЭМ-изображения ВО в ННРС (а, б) и ХСРИ, измеренный в обл. 30 (в)

аналитических центрах: в НИИЯФ им. Д. В. Скобелева МГУ им. М. В. Ломоносова и НИИ ПМТ ТУ-МИЭМ.

На рис. 2 представлены два СЭМ-изображения входного окна (ВО) ННРС, полученные при разных увеличениях (рис. а, б), и характеристический спектр рентгеновского излучения (ХСРИ) (рис. в), измеренный в области 30. ВО из бериллиевой бронзы ($\text{Cu}_{98-96}\text{Be}_{2-4}$) имело контакт с водородом при высоком давлении.

В табл. 1 приведены концентрации химических элементов, соответствующие ХСРИ на рис. 2, в.

Таблица 1. Концентрации химических элементов, соответствующие ХСРИ на рис. 2, в

Элемент	Серия	$(C \pm \Delta C)$, вес. %	C , ат. %
Медь	К	$95,34 \pm 2,58$	83,75
Кислород	К	$4,66 \pm 2,58$	16,25

Как видно, ВО состоит из меди с малым содержанием кислорода. Присутствующий в составе материала ВО бериллий (2–4 ат. %) использованным в измерениях РМЗА спектрометром не регистрируется.

На рис. 3 представлены участки поверхности ВО с различным увеличением, на которых наблюдаются значительно деструктурированные поверхности в результате воздействия облучения γ -квантами. На рис. 3, б выделена область 31, где выполнен РМЗА.

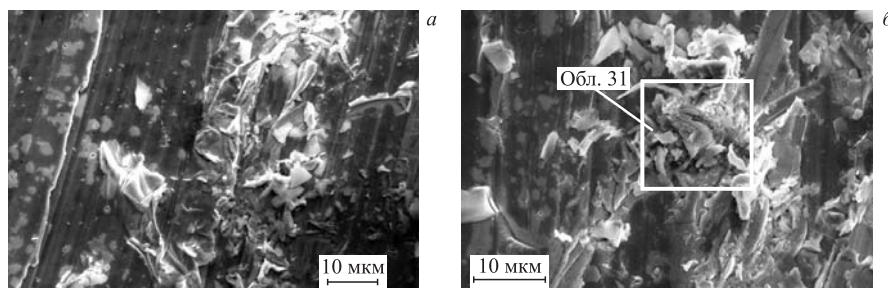


Рис. 3. Два участка ВО с выделенной областью 31, где выполнен РМЗА

На рис. 4 представлен ХСРИ элементного состава ВО, измеренного в области 31. В табл. 2 приводятся соответствующие концентрации элементов.

Из таблицы видно, что в измеренной области 31 присутствуют легкие элементы: ${}^6\text{C}$, ${}^8\text{O}$, ${}^{13}\text{Al}$, ${}^{14}\text{Si}$, ${}^{16}\text{S}$, ${}^{17}\text{Cl}$ и ${}^{20}\text{Ca}$. Отметим относительно большое содержание кремния (19,91 вес. %, или 19,40 ат. %).

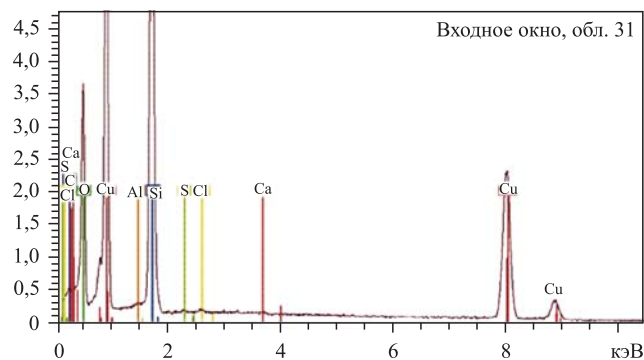


Рис. 4. ХСРИ, измеренный в области 31 ВО на рис. 3, б

Таблица 2. Концентрации химических элементов в области 31 на рис. 3, б

Элемент	Z	Серия	($C \pm \Delta C$), вес. %	C, ат. %
Углерод	6	K	$7,66 \pm 3,09$	17,45
Кислород	8	K	$24,84 \pm 6,38$	42,49
Алюминий	13	K	$0,13 \pm 0,07$	0,14
Кремний	14	K	$19,91 \pm 1,73$	19,40
Сера	16	K	$0,06 \pm 0,06$	0,05
Хлор	17	K	$0,11 \pm 0,07$	0,08
Кальций	20	K	$0,06 \pm 0,06$	0,04
Медь	29	K	$47,24 \pm 2,59$	20,35

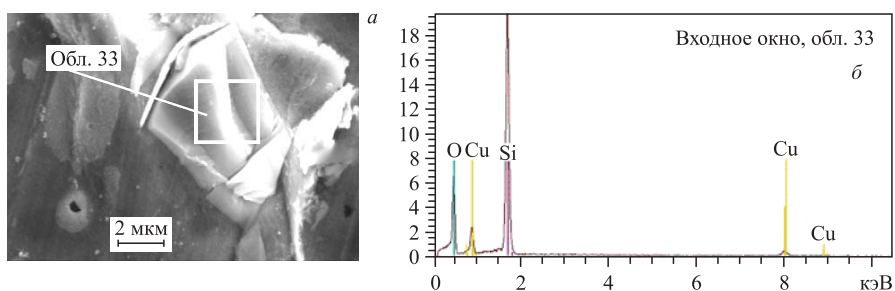


Рис. 5. СЭМ-изображение частицы на поверхности ВО с выделенной областью 33, в которой был проведен РМЗА (а), и соответствующий ХСРИ (б)

На поверхности ВО обнаружены объекты сложной формы, один из которых представлен на рис. 5, *а*. ХСРИ, измеренный в области 33, представлен на рис. 5, *б*. Концентрации химических элементов приведены в табл. 3.

Таблица 3. Концентрации химических элементов, измеренные РМЗА в области 33 на рис. 5, *а*

Элемент	Z	Серия	$(C \pm \Delta C)$, вес. %	C, ат. %
Кислород	8	К	$46,72 \pm 9,22$	64,25
Кремний	14	К	$39,59 \pm 2,20$	31,01
Медь	29	К	$13,69 \pm 4,74$	4,74

Видно, что ВО состоит преимущественно из кремния и кислорода. Отношение концентраций кислорода и кремния составляет C_O (ат. %)/ C_{Si} (ат. %) ≈ 2 . Отсюда можно заключить, что данное соединение является диоксидом кремния (SiO_2). Толщина частицы достаточно значительная, так как основной материал ВО — медь — слабо проявляется и ее концентрация составляет только 4,74 ат. %.

На рис. 6, *а* представлено изображение той же частицы с областью 34, где сделан РМЗА для подтверждения достоверности измерений в области 33 на поверхности ВО, на рис. 6, *б* — ХСРИ, измеренный области 34.

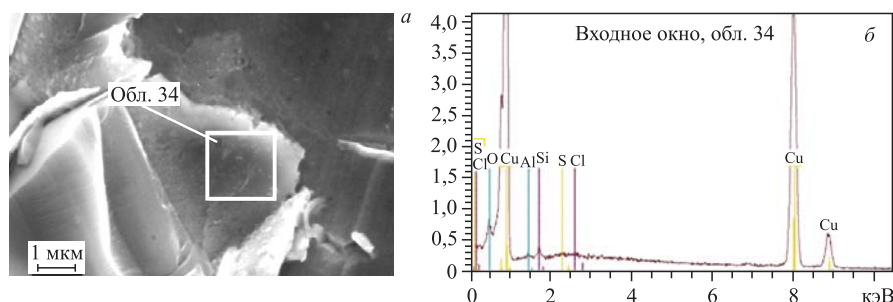


Рис. 6. Изображение частицы на поверхности ВО с выделенной областью, где выполнен РМЗА (*а*), и соответствующий ХСРИ (*б*)

Как видно из спектра на рис. 6, *б*, в этой частице толщина слоя кремния значительно меньше, чем на рис. 5, *б*. Особо отметим, что присутствуют также кислород, алюминий, сера и хлор.

На рис. 7 представлены СЭМ-изображения различных структур, обнаруженных на поверхности ВО. Первые три изображения на рис. 7, *а–в* — это

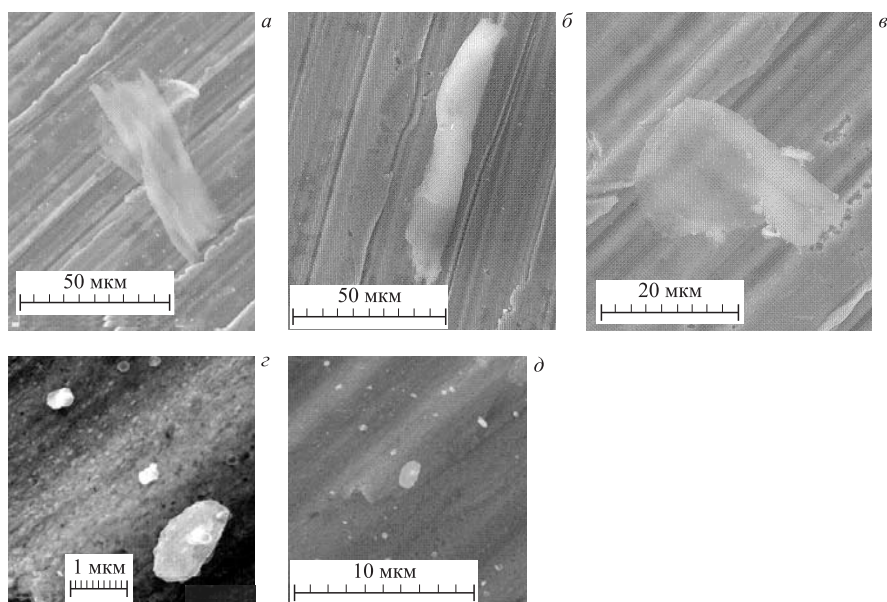


Рис. 7. СЭМ-изображения различных структур на поверхности ВО

различные конфигурации микротрубок, остальные два (более мелкие частицы на рис. 7, *г*, *д*) — это частицы с отличающимся элементарным составом. Элементарный состав всех частиц будет представлен ниже.

На рис. 8, *а* представлена частица (см. рис. 7, *г*), на которой вдоль обозначенной полосы сделан РМЗА. Часть измеренных спектров элементов приведена на рис. 8, *б*, а суммарный спектр всех элементов показан на рис. 9.

Из рис. 8, *б* можно сделать вывод, что частица состоит из свинца (50 отн. ед.), хлора (60 отн. ед.), алюминия (18 отн. ед.), фосфора (до 20 отн. ед.) с присутствием азота (до 7 отн. ед.). Значения концентраций взяты в максимумах распределений.

На рис. 10, *а* представлено изображение частицы малого размера на поверхности ВО с отмеченной точкой 35, где проведен РМЗА, а на рис. 10, *б* — ХСРИ, измеренный в этой точке. В табл. 4 приведен соответствующий элементный состав.

Эта частица размером около 0,5 мкм содержит относительно много свинца (2,22 ат. %, или 11,19 вес. %), а при учете того, что область возбуждения рентгеновского излучения гораздо больше 1 мкм, можно считать, что эта частица

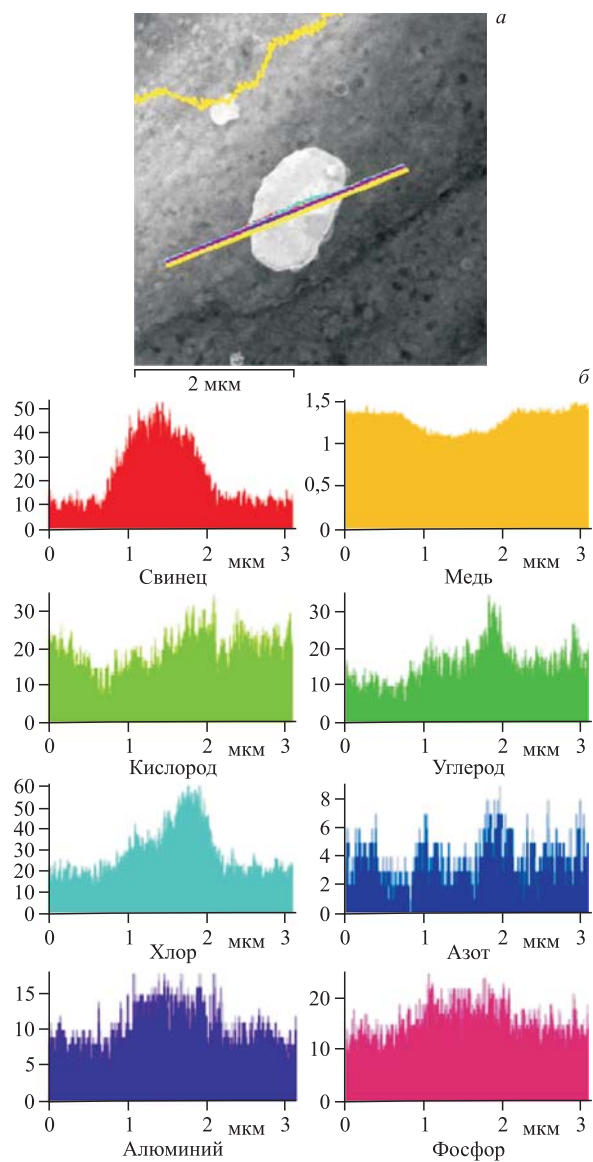


Рис. 8. СЭМ-изображение частицы (а) и ХСРИ (б), промеренные вдоль полосы сканирования на рис. а

состоит преимущественно из свинца в соединении с другими элементами: углеродом (34,59 ат. %) и кислородом (16,35 ат. %).

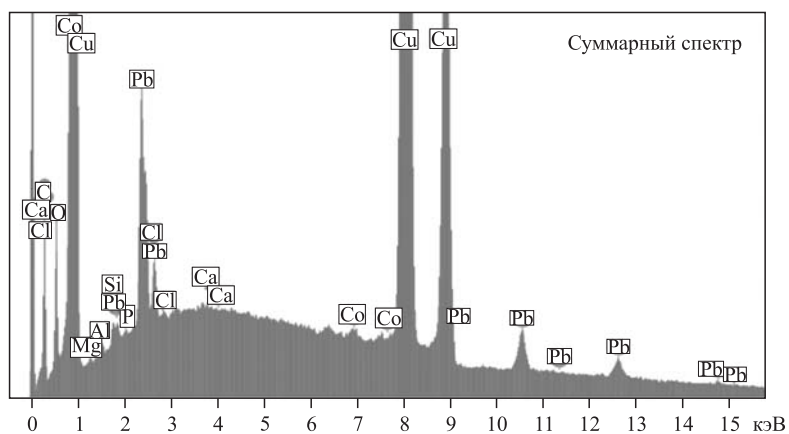


Рис. 9. Суммарный ХСРИ по полосе на рис. 8, а

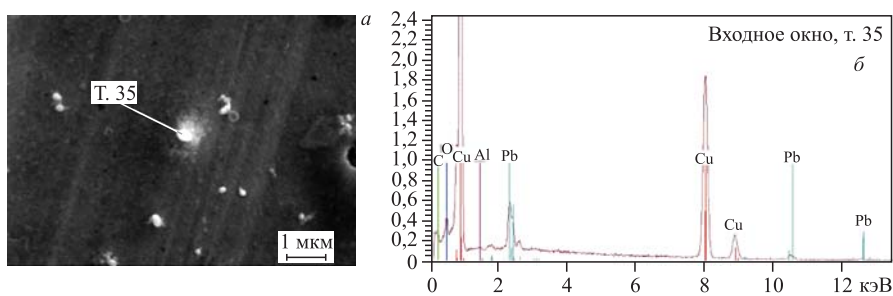


Рис. 10. СЭМ-изображение частицы на поверхности ВО с выделенной точкой 35, где выполнен РМЗА (а), и соответствующий ХСРИ (б)

Таблица 4. Распределение концентраций элементов в ВО (точка 35)

Элемент	Z	Серия	($C \pm \Delta C$), вес. %	C, ат. %
Углерод	6	K	$10,11 \pm 3,91$	34,59
Кислород	8	K	$6,37 \pm 2,30$	16,35
Алюминий	13	K	$0,10 \pm 0,07$	0,15
Медь	29	K	$72,23 \pm 4,05$	46,69
Свинец	82	L	$11,19 \pm 1,06$	2,22

На рис. 11 представлены с разным увеличением изображения двух участков поверхности ВО с частицами иного вида. На рис. 11, б видно, что по всей границе частицы размером примерно 4×8 мкм присутствуют такие же ма-

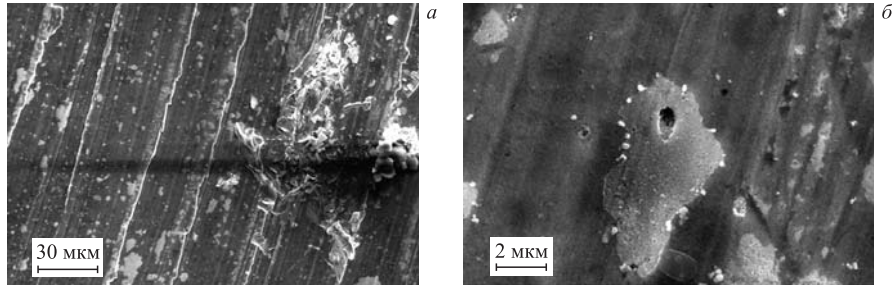


Рис. 11. СЭМ-изображения областей ВО с различным увеличением: $\times 1,6\text{K}$ (а) и $\times 19,63\text{K}$ (б)

ленькие светлые частицы, как и на рис. 10, а, состоящие из свинца. Такие же частицы обнаружены и на других участках поверхности.

На рис. 12, а представлено изображение участка поверхности ВО с тонкостенной трубчатой структурой длиной более 100 мкм. В двух областях этой структуры (область 36) площадями примерно $7,5 \times 20$ мкм были проведены РМЗА. Один из ХСРИ представлен на рис. 12, б. Похожие трубки см. на рис. 2, б и 7, а-в. Отметим, что при измерении этих двух спектров тонкостенная трубка претерпела значительные изменения: ее диаметр в месте измерения уменьшился, т.е. трубка сжалась, а стенка трубки здесь потемнела. Как видно из спектра на рис. 12, б, несмотря на большую анализируемую площадь ≈ 150 мкм², с которой был измерен ХСРИ, отчетливо просматриваются пики подложки из меди, а легкие элементы, из которых и состоит трубка, видны очень слабо. Именно поэтому трубка названа нами тонкостенной. На рис. 13 представлен ХСРИ подобной трубки, измеренный в другом

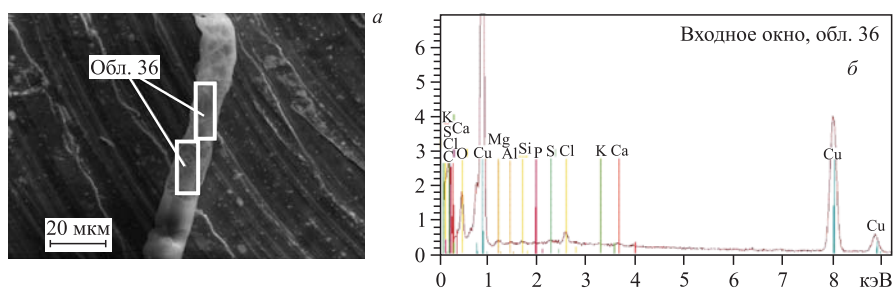


Рис. 12. Изображение трубчатой частицы на поверхности ВО с двумя областями 36, где был выполнен РМЗА (а), и соответствующий ХСРИ (б)

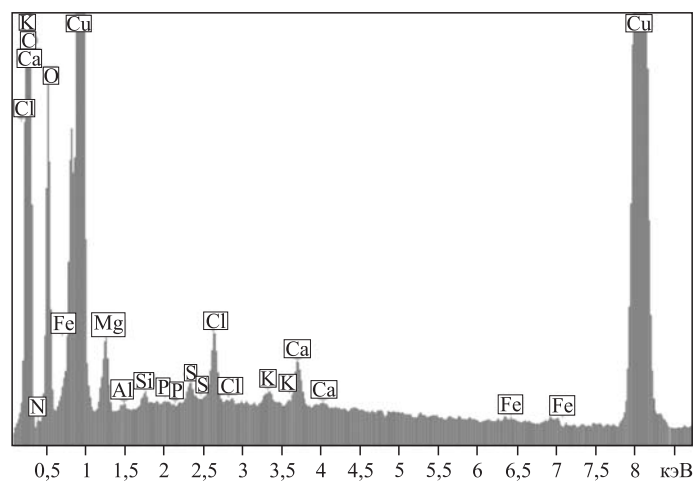


Рис. 13. ХСРИ, измеренный на другой трубчатой частице

аналитическом центре на более современном сканирующем электронном микроскопе и анализаторе. Хорошо видно, что в состав данной структуры входят следующие химические элементы: ${}^6\text{C}$, ${}^7\text{N}\uparrow$, ${}^8\text{O}$, ${}^7\text{N}\uparrow$, ${}^9\text{F}\uparrow$, ${}^{12}\text{Mg}$, ${}^{13}\text{Al}$, ${}^{14}\text{Si}$, ${}^{15}\text{P}$, ${}^{16}\text{S}$, ${}^{17}\text{Cl}$, ${}^{18}\text{Ar}\uparrow$, ${}^{19}\text{K}$ и ${}^{20}\text{Ca}$. Как отмечено выше, концентрации этих элементов малы по сравнению с пиками спектра подложки из меди, что объясняется малой толщиной стенки трубки (возможно, в несколько десятков атомных слоев). Фактически здесь присутствует весь ряд легких элементов от углерода до кальция, за исключением азота, фтора, неона и аргона, которые являются летучими элементами. В представленном выше ряду обнаруженных химических элементов они обозначены стрелками: ${}^7\text{N}\uparrow$, ${}^9\text{F}\uparrow$, ${}^{10}\text{Ne}\uparrow$, ${}^{18}\text{Ar}\uparrow$.

На рис. 14, *a* представлено СЭМ-изображение участка поверхности ВО с другой, похожей тонкостенной трубчатой структурой длиной 160 мкм,

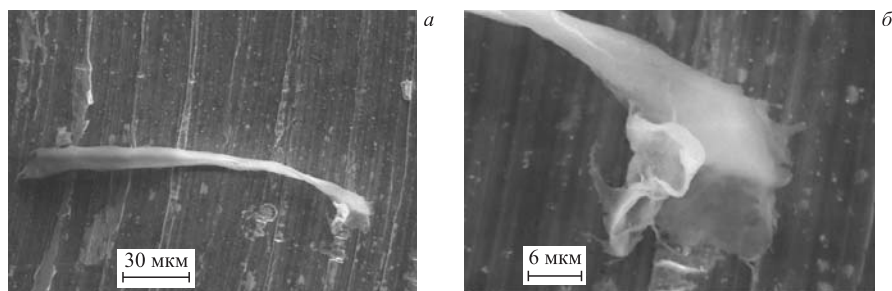


Рис. 14. СЭМ-изображения трубчатой частицы на поверхности ВО (*a*) и ее расширенной «головной» части (*б*)

а на рис. 14, б — с ее расширенной «головной» частью. Видно, что частица представляет собой свернутую в трубку плоскость. РМЗА показывает, что эта трубка тонкостенная.

На рис. 15, а показана уширенная часть тонкостенной трубки с областью 37, на которой был выполнен РМЗА. ХСРИ приведен на рис. 15, б. СЭМ-изображение уширенной «головной» части этой трубки очень похоже на «раскрывшийся» участок свернутой плоскости. Она, возможно, была создана за счет образования на поверхности ВО нескольких десятков слоев плоской структуры, преимущественно состоящих из легких элементов, которая затем за счет поверхностного натяжения свернулась в трубку.

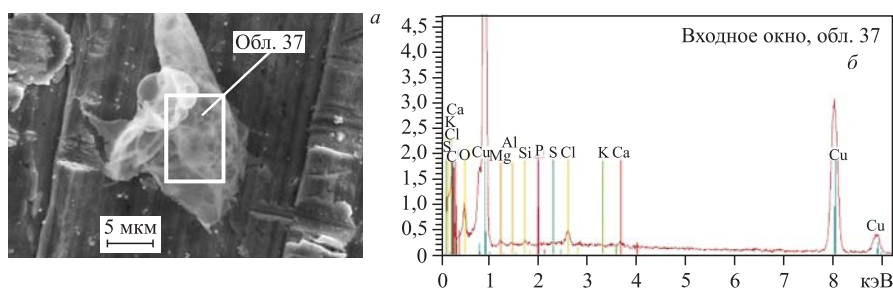


Рис. 15. Изображение трубчатой частицы на поверхности ВО с областью 37 (а), где был проведен РМЗА, и соответствующий ХСРИ (б)

Как и при измерении ХСРИ на рис. 12, а, эта тонкостенная трубка также претерпела существенные изменения: ее диаметр в месте измерения уменьшился, а сама стенка трубки потемнела. Как видно из рис. 15, б, здесь также имеет место интенсивный сигнал от медно-бериллиевой подложки, несмотря на то, что анализируемая площадь «головной» части «раскрывшейся» трубки составляет примерно $6,3 \times 10$ мкм. Тем не менее сигналы от ее материала, состоящего из легких элементов, присутствуют в спектре, хотя имеют малую интенсивность. Как и на рис. 12, а, б, элементный состав этой «головной» части тонкостенной «раскрывшейся» трубки следующий: ${}_6\text{C}$, ${}_7\text{N}\uparrow$, ${}_8\text{O}$, ${}_7\text{N}\uparrow$, ${}_9\text{F}\uparrow$, ${}_{12}\text{Mg}$, ${}_{13}\text{Al}$, ${}_{14}\text{Si}$, ${}_{17}\text{Cl}$, ${}_{18}\text{Ar}\uparrow$ и ${}_{20}\text{Ca}$. Эти линии, ввиду малой толщины стенки трубки, слабо проявлены в сравнении с интенсивными линиями материала подложки, состоящей из меди.

На поверхности ВО обнаружена частица размером $21,6 \times 9,6$ мкм (рис. 16), на которой проведен РМЗА по всей площади с регистрацией двух выделенных элементов: меди (малиновый цвет) и кремния (зеленый цвет). Видно, что частица состоит в основном из меди (бериллий не идентифицируется по указанным выше причинам). Отдельные части структуры (вкрапления) содержат, видимо, оксид кремния (зеленый цвет).

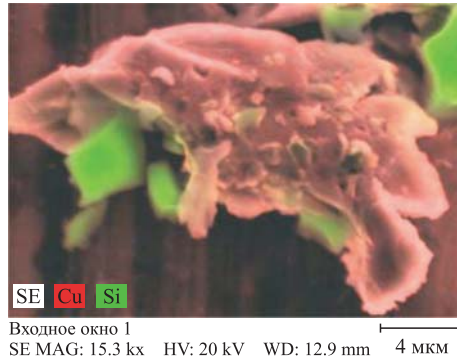


Рис. 16. Изображение отдельной частицы сложной формы на поверхности ВО, состоящей из кремния и меди

2.2. Манганиновая разделительная фольга (рис. 1, поз. 10). Отметим, что манганиновая фольга была сохранена в ННРС (рис. 1, поз. 10) без палладиевого стержня (рис. 1, поз. 9), но с заполнением камеры молекулярным водородом при давлении 1 кбар (рис. 1, поз. 7) для более полного воспроизведения условий облучения в ННРС с Pd-стержнем в атмосфере плотного водорода (см. [17]).

На рис. 17, *а* приведено СЭМ-изображение поверхности манганиновой фольги (далее МФ), покрытой кавернами. На рис. 17, *б* представлен ХСРИ, измеренный практически со всей площади поверхности. В табл. 5 показан элементный состав, соответствующий спектру на рис. 17, *б*.

Из таблицы видно: отношение атомных концентраций в МФ составляет $C_{Cu} \text{ (ат. \%)} : C_{Mn} \text{ (ат. \%)} : C_{Ni} \text{ (ат. \%)} = 86,6 : 10,99 : 2,80$, что примерно соответствует концентрации элементов в манганине.

На рис. 18, *а* показано СЭМ-изображение поверхности МФ с инородной частицей, в точке 21 которой проведен РМЗА. Соответствующий ХСРИ

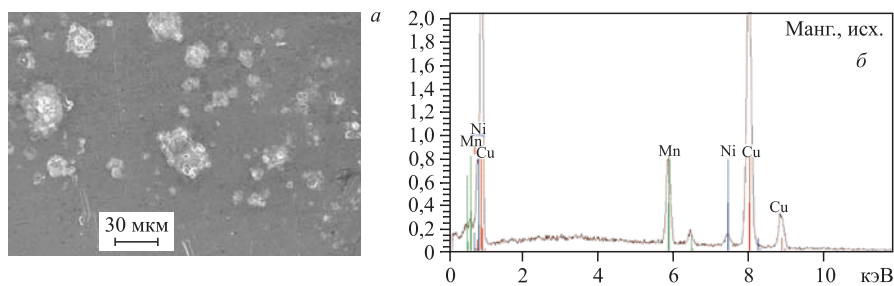


Рис. 17. СЭМ-изображение поверхности МФ, покрытой кавернами (*а*), и соответствующий ХСРИ (*б*), измеренный со всей площади

Таблица 5. Концентрации элементов в МФ

Элемент	Z	Серия	$(C \pm \Delta C)$, вес. %	C, ат. %
Марганец	25	К	$9,67 \pm 0,63$	10,99
Никель	28	К	$2,63 \pm 0,28$	2,80
Медь	29	К	$87,70 \pm 4,91$	86,20

дан на рис. 18, б. В табл. 6 представлен элементный состав в точке 21 на рис. 18, а.

ХСРИ, ввиду малости размера частицы, измерен с использованием пониженной энергии пучка электронов сканирующего микроскопа, а именно при 20 кэВ. Из рис. 18, а и табл. 6 видно, что помимо материалов подложки из манганина ($\text{Cu}_{84}\text{Mn}_{14}\text{Ni}_2$) на поверхности присутствуют в небольших концентрациях элементы О, Mg, Al, Si, Cl, а также Mn, Cu и Ni. Из этого спектра

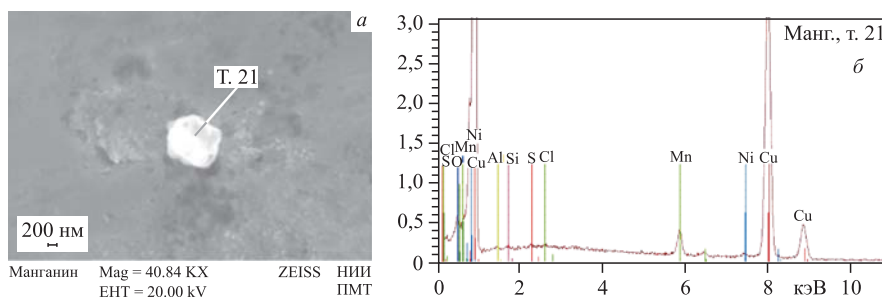


Рис. 18. СЭМ-изображение малой частицы на поверхности МФ (а) и ХСРИ в точке 21 (б), измеренный при энергии электронов 20 кэВ

Таблица 6. Концентрация элементов на поверхности МФ в точке 21 при энергии электронов 20 кэВ

Элемент	Z	Серия	$(C \pm \Delta C)$, вес. %	C, ат. %
Кислород	8	К	$13,12 \pm 3,77$	34,84
Магний	12	К	$0,07 \pm 0,07$	0,12
Алюминий	13	К	$0,05 \pm 0,06$	0,07
Кремний	14	К	$0,21 \pm 0,09$	0,32
Сера	16	К	$0,14 \pm 0,07$	0,18
Хлор	17	К	$11,99 \pm 0,95$	14,37
Марганец	25	К	$3,17 \pm 0,50$	2,45
Медь	29	К	$71,25 \pm 17,25$	47,63

можно сделать вывод, что изучаемая частица со средним диаметром примерно 1,08 мкм имеет малую толщину и электронный пучок с энергией электронов 20 кэВ воздействует в основном на подложку из манганина.

Для уменьшения глубины слоя возбуждения характеристического рентгеновского излучения энергия электронного пучка была снижена до 10 кэВ. На рис. 19 представлен спектр, измеренный при этой энергии электронов. В табл. 7 даны соответствующие концентрации элементов.

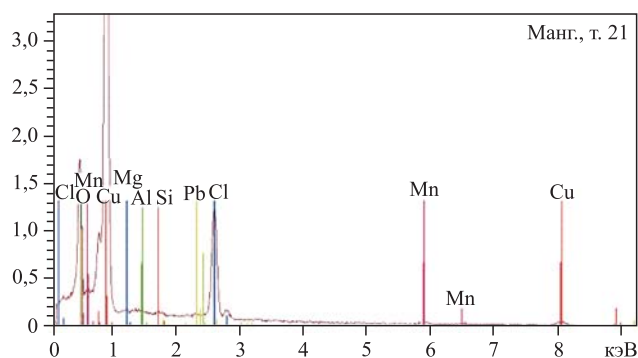


Рис. 19. ХСРИ в т. 21 на рис. 18, а, измеренный при энергии электронов 10 кэВ

Таблица 7. Концентрация элементов на поверхности МФ в точке 21 при энергии электронов 10 кэВ

Элемент	Z	Серия	($C \pm \Delta C$), вес. %	C, ат. %
Кислород	8	К	$13,05 \pm 3,78$	34,86
Магний	12	К	$0,07 \pm 0,07$	0,12
Алюминий	13	К	$0,05 \pm 0,06$	0,07
Кремний	14	К	$0,18 \pm 0,08$	0,28
Хлор	17	К	$11,93 \pm 0,95$	14,39
Марганец	25	К	$3,24 \pm 0,51$	2,52
Медь	29	К	$70,77 \pm 17,31$	47,61
Свинец	82	М	$0,70 \pm 0,14$	0,14

Можно сделать вывод, что в данной частице присутствуют О, Mg, Al, Si, Cl в большом количестве (11,93 вес. %, или 14,39 ат. %) и в малом количестве свинец.

2.3. Латунный сборник продуктов реакций (рис. 1, поз. 12). На рис. 20, а представлен общий вид латунного сборника (далее ЛС) (рис. 1, поз. 12) с сильно измененной центральной частью (вдоль оси ННРС) в виде пятна диаметром 621,7 мкм и другими видимыми аномалиями (частицами) в правой части и ниже центра сборника. На рис. 20, б приведена часть поверхности ЛС,

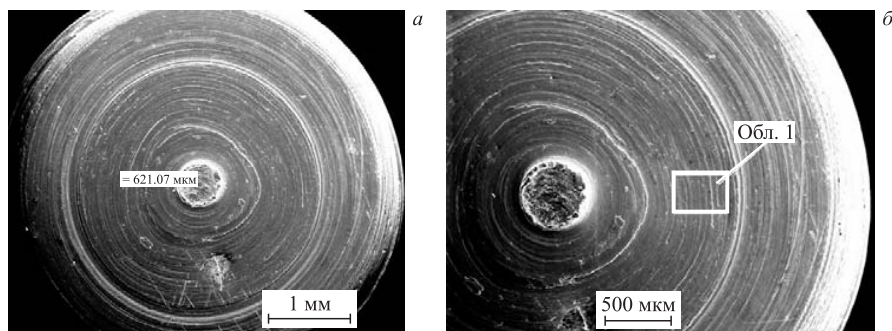


Рис. 20. СЭМ-изображения общего вида ЛС с пятном в центре (а) и части поверхности ЛС с выделенной областью 1, где сделан РМЗА

внешне не измененная, с выделенной областью 1, на которой был проведен РМЗА. На рис. 21 представлен ХСРИ, измеренный в области 1, имеющей площадь 480×360 мкм. В табл. 8 показан ее элементный состав.

Как видно из рис. 21, в ХСРИ латуни присутствуют только медь и цинк, а их отношение $Cu_{\text{эксп}} (\text{ат. \%}) : Zn_{\text{эксп}} (\text{ат. \%}) = 59,61 : 40,39$ очень хорошо согласуется с аналогичным паспортным отношением для латуни 60 : 40 ат. %.

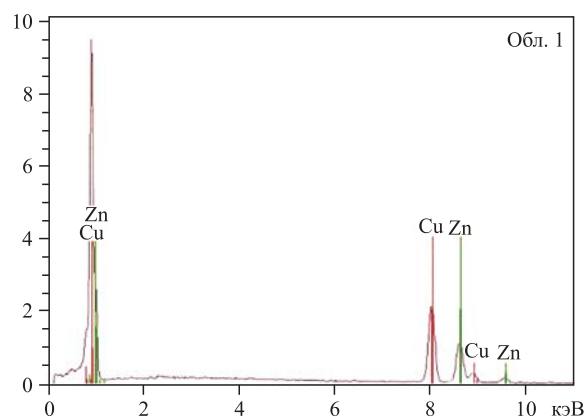


Рис. 21. ХСРИ, измеренный в области 1 на рис. 20, б

Таблица 8. Концентрация элементов ЛС в области 1 на рис. 20, б

Элемент	Z	Серия	$(C \pm \Delta C)$, вес. %	C, ат. %
Медь	29	К	$58,92 \pm 3,06$	59,61
Цинк	30	К	$41,08 \pm 2,26$	40,39

На рис. 22, *a* представлена центральная часть ЛС с измененным пятном диаметром 621,7 мкм (область 2), а на рис. 22, *б* — соответствующий ХСРИ.

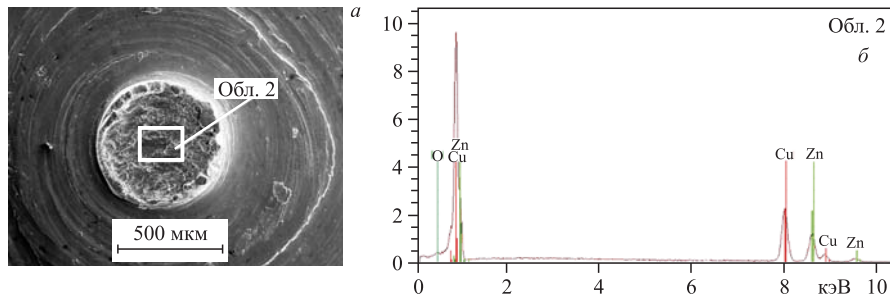


Рис. 22. СЭМ-изображение участка поверхности ЛС (*a*) и ХСРИ (*б*), проведенный в области 2

Сравнение спектров на рис. 21, *б* и 22, *б* показывает, что изменений элементного состава в сильно деструктурированном пятне не произошло, по-видимому, здесь проходили процессы эрозии поверхности при прохождении γ -квантов в присутствии водорода при давлении 1 кбар. Чтобы выяснить причины, по которым так изменилась центральная часть ЛС, на рис. 23 представлены два СЭМ-изображения центральной части деструктурированного пятна с разными увеличениями: $\times 461$ и $\times 948$.

Поверхность пятна на рис. 23 сильно видоизменилась и напоминает застывшую структуру, которая образована чем-то вроде воздействия некоего вихревого потока, так как имеет наклон справа налево.

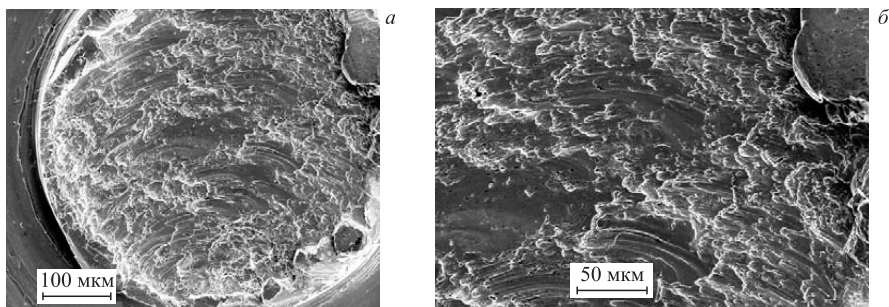


Рис. 23. СЭМ-изображения деструктурированной центральной области ЛС с меньшим ($\times 461$) (*a*) и большим ($\times 948$) (*б*) увеличениями

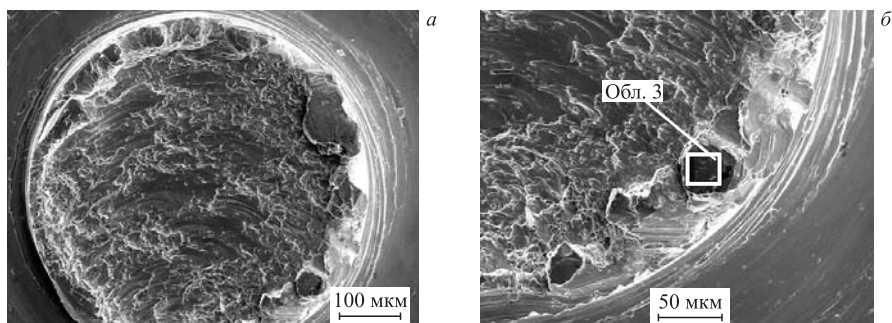


Рис. 24. СЭМ-изображения центральной части деструктурированного пятна с явно видимыми границами (а) и участок пятна вблизи границы с измерением ХСРИ на плоской части поверхности в области 3 (б)

На рис. 24 представлены СЭМ-изображения центральной части деструктурированного пятна с явно видимыми границами (а) и участок пятна вблизи границы с измерением ХСРИ на плоской части поверхности в области 3 (б). На рис. 25 приведен ХСРИ, измеренный в области 3 на рис. 24, б.

Как видно из рис. 25, в спектре по-прежнему присутствуют только медь и цинк! Это свидетельствует о том, что ядерных реакций водорода и γ -квантов с ядрами меди и цинка не происходит, а потока нейтронов из (γ, n) -реакций в вольфрамовой тормозной мишени и в бериллии (бериллиевой бронзе) недо-

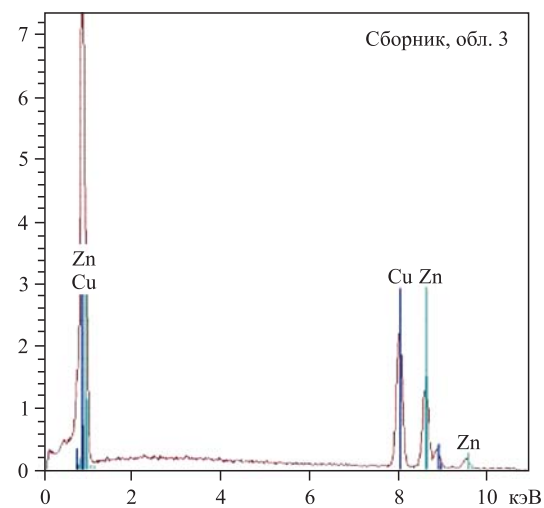


Рис. 25. ХСРИ, измеренный в области 3 на рис. 24, б

статочно, чтобы вызвать существенные изменения химического состава ЛС, которые можно измерить.

На поверхности сборника присутствуют различные структуры; изображение одной из них представлено на рис. 26, *а*; в области 4 измерен ХСРИ. На рис. 26, *б* приведено то же при большем увеличении ($\times 16490$).

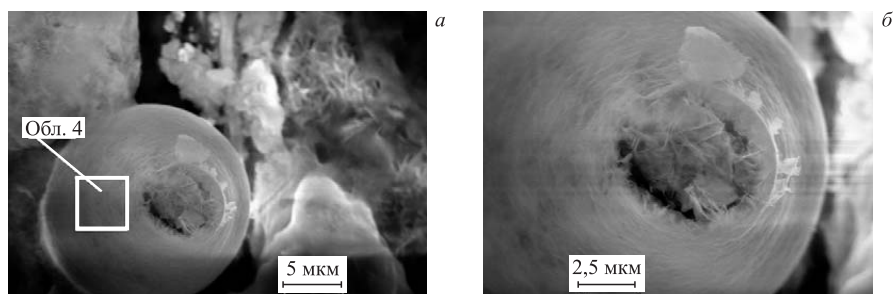


Рис. 26. СЭМ-изображения структуры на поверхности ЛС при разных увеличениях. В области 4 измерен ХСРИ

В сферической структуре диаметром примерно 18,6 мкм имеется отверстие диаметром 7 мкм и с рыхлой структурой внутри сферы с выбросами по краю, что свидетельствует о произошедшем выбросе материала с разрывом поверхности. На рис. 27 приведен ХСРИ, измеренный в области 4 на рис. 26, *а*. В табл. 9 представлен соответствующий элементный состав.

Видно, что в структуре обнаружены легкие элементы, такие как С, О, Al, Si, S, Cl, и более тяжелый металл Ni. Следует особо отметить, что

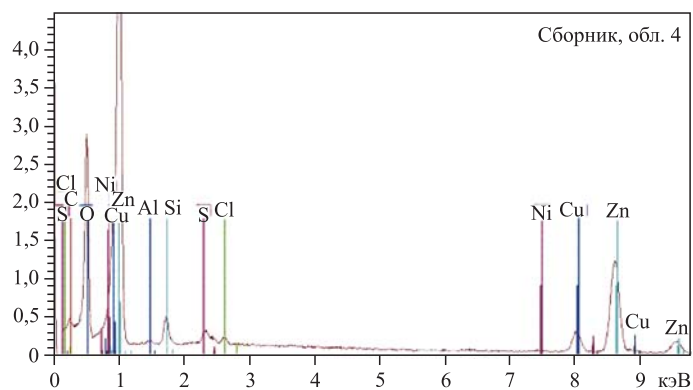


Рис. 27. ХСРИ, измеренный в области 4 на рис. 26, *а*

Таблица 9. Распределение концентраций элементов на ЛС в области 4 на рис. 26, а

Элемент	Z	Серия	($C \pm \Delta C$), вес. %	C, ат. %
Углерод	6	К	$14,70 \pm 4,82$	30,52
Кислород	8	К	$30,45 \pm 7,57$	47,45
Алюминий	13	К	$0,11 \pm 0,07$	0,10
Кремний	14	К	$1,27 \pm 0,17$	1,13
Сера	16	К	$0,54 \pm 0,10$	0,42
Хлор	17	К	$0,32 \pm 0,08$	0,23
Никель	28	К	$0,26 \pm 0,08$	0,11
Медь	29	К	$7,32 \pm 0,48$	2,87
Цинк	30	К	$45,01 \pm 2,46$	17,16

здесь наблюдается, в отличие от спектров на рис. 21, 22, б и 25, значительное превышение концентрации цинка по отношению к меди. Возможно, цинк входит в состав этой сложной структуры.

На рис. 28 приведены СЭМ-изображения отдельных фрагментов, которые присутствуют на рис. 26, а, а именно границы на краю отверстия (а) и пористой структуры, состоящей из более мелких деталей (б), видимых справа на рис. 26, а.

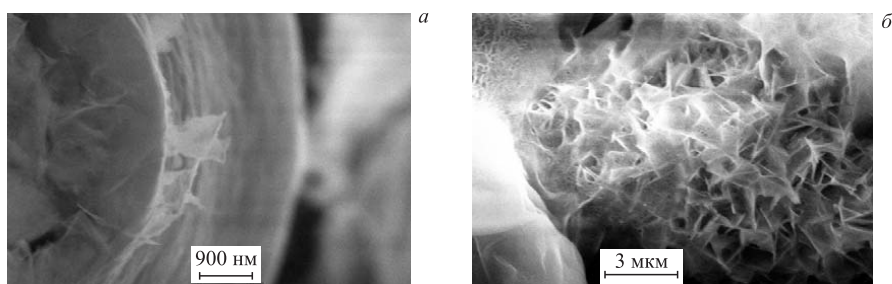


Рис. 28. СЭМ-изображения отдельных фрагментов, которые присутствуют на рис. 26, а: граница на краю отверстия (а) и рыхлая губчатая нитевидная структура (б)

На рис. 29, а представлено СЭМ-изображение всего фрагмента, в которое входит сферический объект на рис. 26, а, б. Он выглядит как «раскрывшаяся чаша» со сложным внутренним рельефом. Увеличенный участок слева от этого фрагмента дан на рис. 29, б. Видны несколько светлых кристаллитов малого размера (порядка 0,5 мкм), на одном из которых и измерен ХСРИ в точке 5 (рис. 30). В табл. 10 описаны концентрации элементов в этой точке. Как видно из спектра, обнаружены преимущественно легкие химические эле-

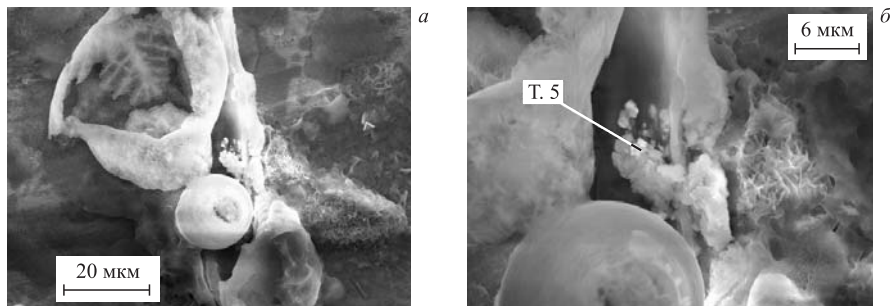


Рис. 29. СЭМ-изображения полного фрагмента, в который входит сферический объект (а), представленный на рис. 26, и увеличенное изображение участка слева от этого фрагмента (б), в точке 5 которого проведен РМЗА и измерен ХСРИ

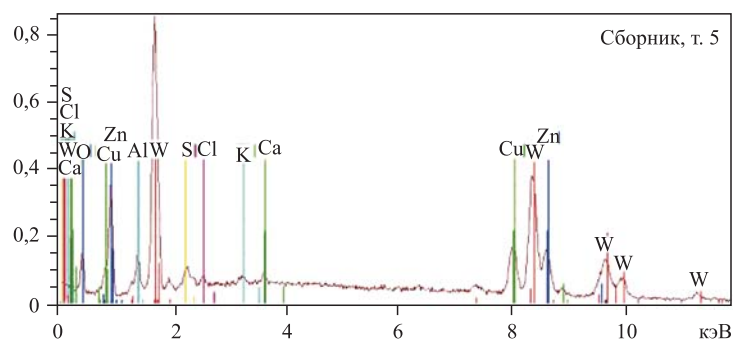


Рис. 30. ХСРИ, измеренный в точке 5 на рис. 29, б

Таблица 10. Концентрации элементов на ЛС в точке 5 на рис. 29, б

Элемент	Z	Серия	$(C \pm \Delta C)$, вес. %	C, ат. %
Кислород	8	K	$6,43 \pm 2,63$	32,62
Алюминий	13	K	$1,94 \pm 0,30$	5,85
Сера	16	K	$1,15 \pm 0,17$	2,90
Хлор	17	K	$0,52 \pm 0,11$	1,18
Кальций	20	K	$0,37 \pm 0,10$	0,77
Железо	26	K	$0,28 \pm 0,09$	0,40
Медь	29	K	$9,56 \pm 0,68$	12,22
Цинк	30	K	$10,15 \pm 0,73$	12,60
Вольфрам	74	K	$69,17 \pm 4,35$	30,55

менты — O, Al, S, Cl, K и Ca. Как видно, пять линий с высокой интенсивностью соответствуют вольфраму, элементу с номером $Z = 74$, с очень высокой концентрацией: 69,17 вес. %, или 30,55 ат. %! Первые пики вольфрама при малой энергии даже превосходят пики от меди и цинка. Все эти пять пиков несколько смещены от табличных стандартов в область меньших энергий, но присутствуют все линии спектра, которые должны быть! Следует особо отметить, что пики от цинка превышают пики от меди, а их атомные отношения близки: $\text{Cu (ат. \%)} : \text{Zn (ат. \%)} = 49,23 : 50,77$.

Для уточнения полученных выше результатов был измерен ХСРИ в точке 6 (рис. 31, а), рядом с обнаруженными светлыми частицами вольфрама. Спектр представлен на рис. 31, б. Соответствующие концентрации элементов приведены в табл. 11. Как видно из спектра и таблицы, элементный состав в точке 6

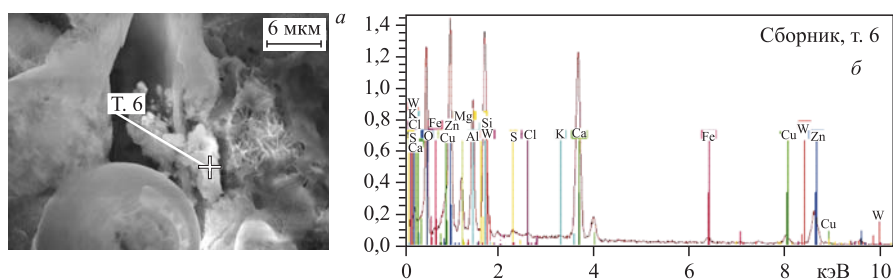


Рис. 31. СЭМ-изображение области рядом со сферическим объектом на рис. 26 (а), в точке 6 которого проведен РМЗА и измерен ХСРИ (б)

Таблица 11. Распределение концентраций элементов в ЛС в точке 6 на рис. 31, а

Элемент	Z	Серия	$(C \pm \Delta C)$, вес. %	C , ат. %
Кислород	8	К	$39,19 \pm 10,84$	60,74
Магний	12	К	$4,56 \pm 0,58$	4,65
Алюминий	13	К	$8,16 \pm 0,84$	7,50
Кремний	14	К	$10,04 \pm 0,90$	8,87
Фосфор	15	К	$0,28 \pm 0,09$	0,22
Сера	16	К	$0,35 \pm 0,10$	0,27
Хлор	17	К	$0,24 \pm 0,09$	0,17
Калий	19	К	$0,08 \pm 0,07$	0,05
Кальций	20	К	$14,76 \pm 0,91$	9,13
Железо	26	К	$0,78 \pm 0,14$	0,35
Никель	28	К	$0,40 \pm 0,12$	0,17
Медь	29	К	$3,06 \pm 0,32$	1,19
Цинк	30	К	$17,38 \pm 1,14$	6,59
Вольфрам	74	К	$0,71 \pm 0,19$	0,10

оказался более разнообразным, чем в точке 5. Здесь найден ряд легких химических элементов, таких как O, Mg, Al, Si, S, Cl, K, Ca, и более тяжелые элементы — железо и никель.

Видно также, что здесь пики от кислорода (60,74 ат. %), кремния (8,87 ат. %) и кальция (9,13 ат. %) сравнимы с пиками от цинка. В свою очередь, пик от цинка (6,59 ат. %) также более интенсивен, чем пики от меди (1,19 ат. %).

На рис. 32, *a* представлен фрагмент сложной фигуры рис. 29, *a* — основание «раскрывшейся чаши», т.е. области, расположенной рядом со сферическим объектом на рис. 26, *a*. ХСРИ в точке 7 дан на рис. 32, *б*. Видно, что здесь присутствуют O, Si, S, Cl и опять же пики цинка значительно превышают пики меди.

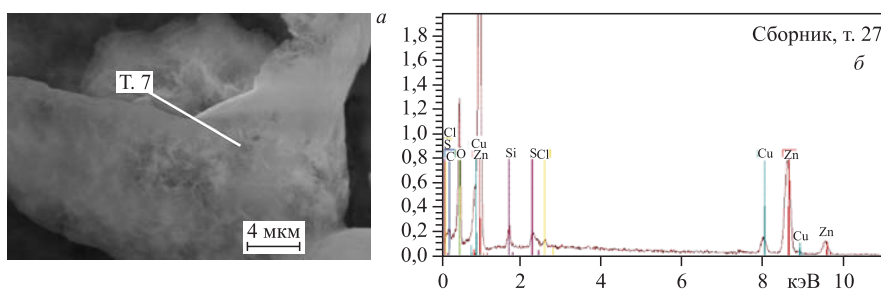


Рис. 32. СЭМ-изображение части структуры (*a*); ХСРИ в точке 7 (*б*)

На рис. 33, *a* приведено СЭМ-изображение другого участка «раскрывшейся чаши» рис. 29, *a, б*. На рис. 33, *б* показан ХСРИ, измеренный в точке 8, а в табл. 12 отображен соответствующий элементный состав. В изученной области присутствуют легкие элементы — O, Si, S и Cl наряду с элементами

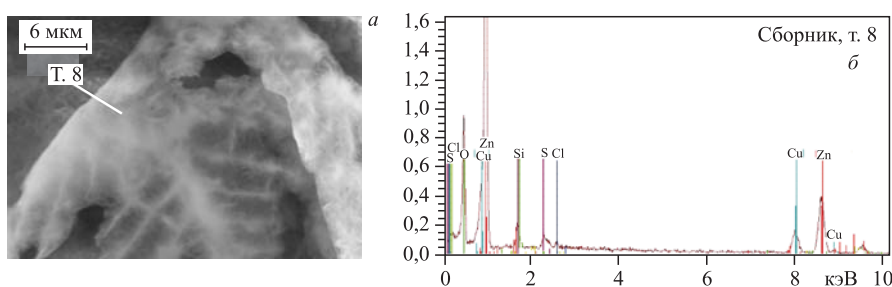


Рис. 33. СЭМ-изображение структуры в виде «раскрывшейся чаши» (*a*) и ХСРИ в точке 8 (*б*)

Таблица 12. Концентрации элементов на ЛС в точке 8 на рис. 33, а

Элемент	Z	Серия	($C \pm \Delta C$), вес. %	C, ат. %
Кислород	8	К	$28,38 \pm 8,44$	60,09
Алюминий	13	К	$0,25 \pm 0,11$	0,31
Кремний	14	К	$2,28 \pm 0,29$	2,75
Сера	16	К	$1,15 \pm 0,18$	1,22
Хлор	17	К	$0,46 \pm 0,12$	0,44
Медь	29	К	$15,22 \pm 1,07$	8,12
Цинк	30	К	$52,26 \pm 2,95$	27,07

ЛС — цинком и медью. Интенсивность пиков от цинка (27,07 ат. %) также сильно превосходит интенсивность пиков от меди (8,12 ат. %).

На рис. 34 представлено СЭМ-изображение поверхности ЛС с тонкостенной трубчатой структурой (а) (см. рис. 2, а, 7, а–в, 12, 14 и 15 с аналогичными структурами на поверхности ВО), а ХСРИ, измеренный в точке 9, показан на рис. 34, б. В табл. 13 приведены соответствующие концентрации элементов.

Такая же тонкостенная трубка на поверхности ВО с похожим элементным составом видна на рис. 12, 14, а, б и 15. В изученной области присутствуют такие легкие элементы, как О (53,12 ат. %), Mg (1,18 ат. %), Al (1,42 ат. %), Si (3,50 ат. %), S (1,80 ат. %), Cl (0,99 ат. %), K (0,33 ат. %), Ca (1,23 ат. %) наряду с элементами ЛС — цинком (26,86 ат. %) и медью (7,98 ат. %). Интенсивность пиков от цинка также превосходит интенсивность пиков от меди. Но здесь, в отличие от элементного состава на ВО, найдены такие тяжелые металлы, как железо (0,33 ат. %) и никель (1,09 ат. %).

На поверхности ЛС также обнаружены плоские частицы, одна из которых показана на рис. 35, а. В области 11 проведен РМЗА, ХСРИ представлен на рис. 35, б.

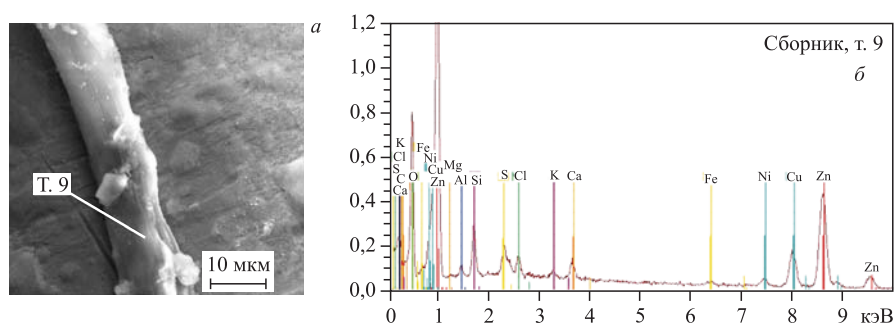


Рис. 34. СЭМ-изображение структуры в виде тонкостенной трубки (а) и ХСРИ в точке 9 (б)

Таблица 13. Концентрации элементов на ЛС в точке 9 на рис. 34, а

Элемент	Z	Серия	$(C \pm \Delta C)$, вес. %	C, ат. %
Кислород	8	K	$24,13 \pm 5,01$	53,12
Магний	12	K	$0,82 \pm 0,15$	1,18
Алюминий	13	K	$1,09 \pm 0,15$	1,42
Кремний	14	K	$2,79 \pm 0,25$	3,50
Фосфор	15	K	$0,13 \pm 0,07$	0,15
Сера	16	K	$1,64 \pm 0,15$	1,80
Хлор	17	K	$1,00 \pm 0,12$	0,99
Калий	19	K	$0,36 \pm 0,08$	0,33
Кальций	20	K	$1,40 \pm 0,13$	1,23
Железо	26	K	$0,55 \pm 0,10$	0,35
Никель	28	K	$1,82 \pm 0,16$	1,09
Медь	29	K	$14,40 \pm 0,69$	7,98
Цинк	30	K	$49,87 \pm 2,13$	26,86

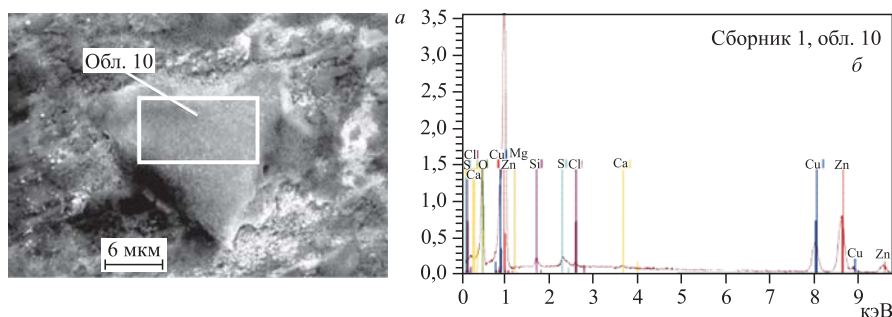


Рис. 35. СЭМ-изображение плоской частицы на поверхности ЛС (а) и ХСРИ в области 10

Отметим, что РМЗА в области 10 площадью $12,3 \times 6,3$ мкм выявил O, Mg, Si, S, Cl, Cu и Zn с превышением концентрации цинка по отношению к меди.

На рис. 36, а представлено СЭМ-изображение светлой частицы малого размера (менее 200 нм). ХСРИ в точке 11 представлен на рис. 36, б. Такие частицы присутствуют на поверхности ЛС в значительном количестве.

РМЗА показал, что в малой частице (точка 11) присутствует помимо O, Al и Si свинец, который идентифицируется по множеству своих рентгеновских линий. Соотношение меди к цинку близко к характерному для латуни.

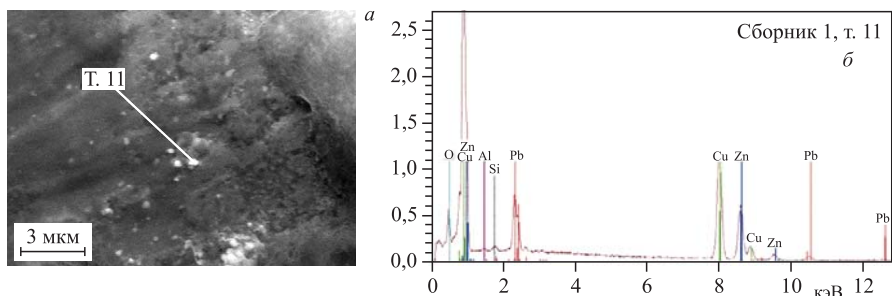


Рис. 36. СЭМ-изображение светлой структуры малого размера (а) и ХСРИ в точке 11 (б)

На рис. 37, а представлено СЭМ-изображение участка поверхности ЛС с протяженной структурой длиной 1 мкм и максимальной шириной 150 нм, а на рис. 37, б — ХСРИ в точке 12. Причем таких структур, но меньшего размера, имеется на изображении несколько. Здесь, как и на рис. 36, б, видно, что присутствует свинец, определенный по своим характеристическим линиям. Соотношение меди к цинку приближается к исходному соотношению для латуни.

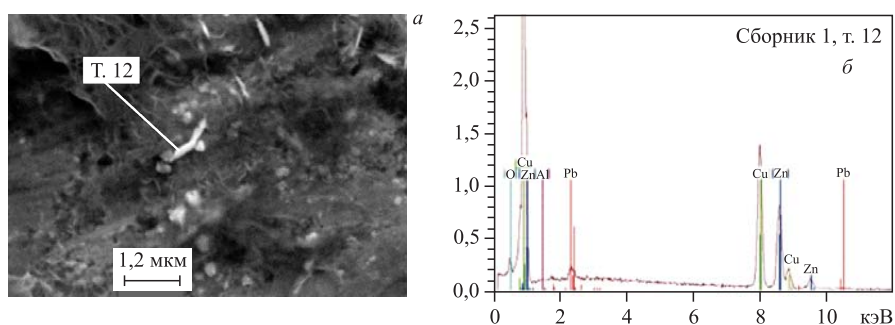


Рис. 37. СЭМ-изображение светлой протяженной структуры (а); ХСРИ в точке 12 (б)

На рис. 38, а дано СЭМ-изображение участка поверхности ЛС со своеобразной сеткой из нитевидных образований и сферических структур, также покрытых нитями (см. похожие структуры в работах [8, 9]). На рис. 38, б представлено увеличенное изображение центрального кластера на рис. 38, а с выделением области 13, где был проведен РМЗА. ХСРИ приведен на рис. 39. Наряду с правильным соотношением концентраций между медью и цинком в латуни, покрытый сеткой из нитевидных образований участок содержит Al, Si, S, Cl, Ca.

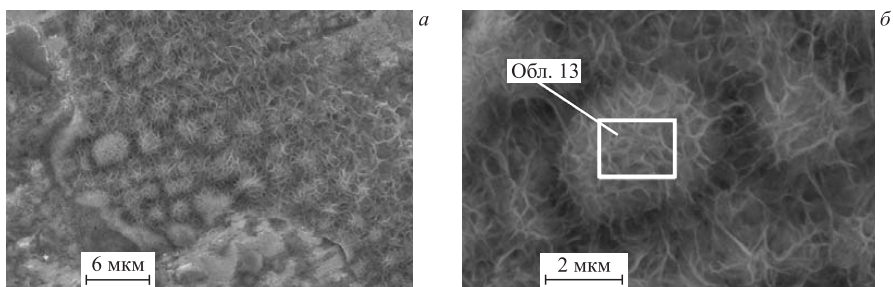


Рис. 38. СЭМ-изображения участка поверхности ЛС, покрытого сеткой из нитевидных образований и сферических структур, с различными увеличениями, с выделением области 13, где проведен РМЗА

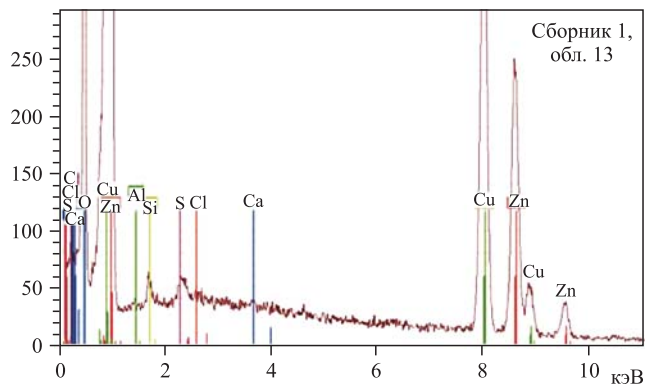


Рис. 39. ХСРИ, измеренный в области 13 на рис. 38, б

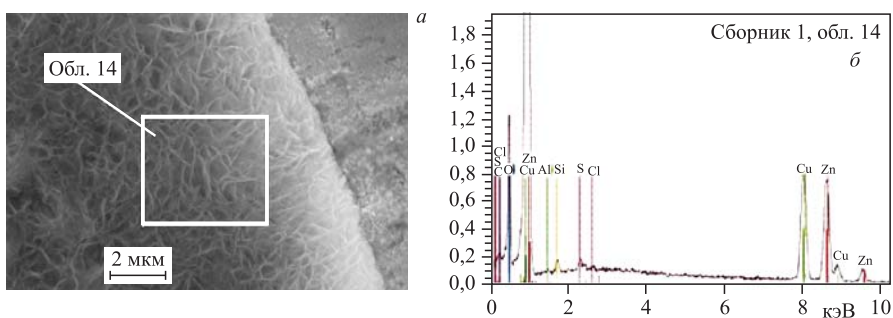


Рис. 40. СЭМ-изображение части трубки (а); ХСРИ в области 14 (б)

На рис. 40, *a* представлено СЭМ-изображение участка трубки на поверхности ЛС, также покрытой сеткой из нитевидных образований, а на рис. 40, *б* — ХСРИ, измеренный в области 14.

Здесь, как и в приведенных выше ХСРИ-измерениях, найдены O, Al, Si, Cl, а пики в спектрах меди и серебра подравнялись по амплитуде.

На рис. 41, *a* представлено СЭМ-изображение светлой структуры длиной более 28,7 мкм и максимальной шириной 11,4 мкм на поверхности ЛС, а на рис. 41, *б* — ХСРИ. В спектре четко проявились пики от O, Al, Si, Cl, K и Ca, а также Ni. Концентрации Cu и Zn близки к исходным концентрациям в латуни.

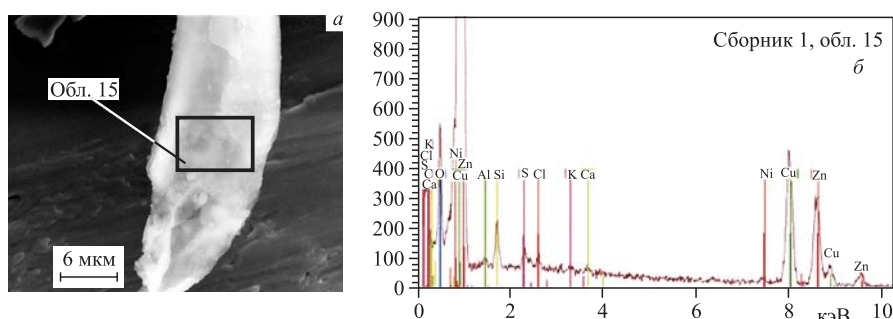


Рис. 41. СЭМ-изображение светлой структуры на поверхности ЛС (*a*); ХСРИ в точке 15 (*б*)

На рис. 42, *a* приведено СЭМ-изображение всей длинной структуры в виде трубки, расположенной на темной поверхности, с особенностями, которые детально изучены выше. Элементный РМЗА проведен в точке 16 на рис. 42, *б*, где встречаются светлые частицы округлой формы, но различных размеров,

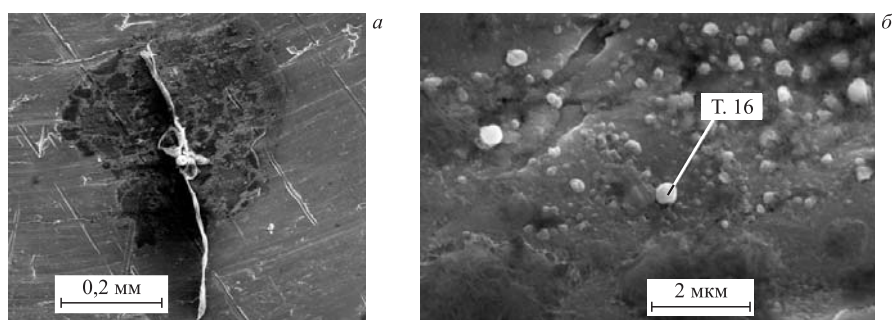


Рис. 42. СЭМ-изображение всей трубки (*a*); ХСРИ в точке 16 на светлой округлой частице (*б*)

диаметрами менее 400 нм. Соответствующий ХСРИ в точке 16 дан на рис. 43. В этой частице присутствуют O, Al, Si, S, Cl и Ca вместе с четко проявившимися пиками от Pb.

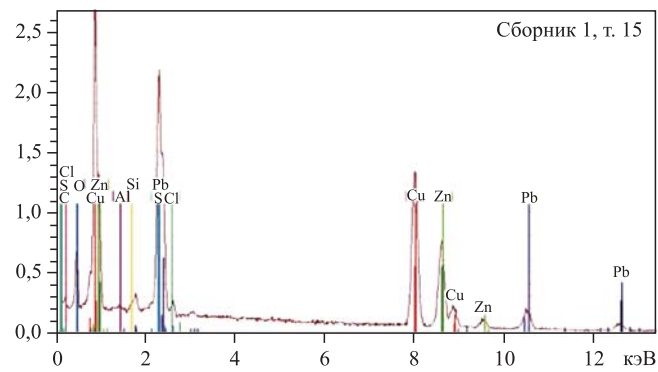


Рис. 43. ХСРИ в светлой частице в точке 16 на рис. 42, б

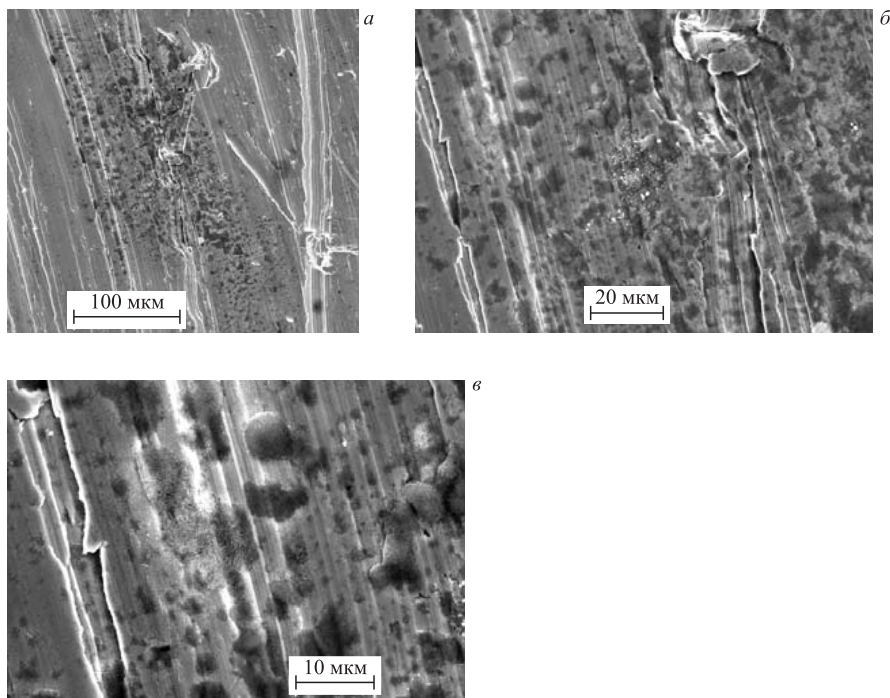


Рис. 44. СЭМ-изображения фрагмента поверхности ЛС с различными увеличениями

На рис. 44, *a–в* представлен фрагмент поверхности ЛС с различными увеличениями ($\times 689$, $\times 2400$ и $\times 5290$). Здесь видны круглые куполообразные образования темного цвета, полученные в процессе облучения γ -квантами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе изучено изменение элементного состава и структуры поверхности ВО из бериллиевой бронзы (рис. 1, поз. 4), МФ (рис. 1, поз. 10) и ЛС продуктов ядерных и химических реакций (рис. 1, поз. 12). Но это не все результаты, полученные в описываемом эксперименте. В данную статью не вошло описание исследований внутренних поверхностей латунной втулки и синтезированных частиц светлого и темного оттенков. Они будут рассмотрены в следующей статье (см. [24]), публикуемой отдельно ввиду большого объема полученных экспериментальных данных, необходимой убедительности в их представлении и обоснованности результатов.

Показано, что имеют место значительные изменения на внутренней поверхности ВО с появлением различных частиц (см. рис. 2, 3, 5, 6, 7, *z, d*, 10, 11, 16), частиц в виде тонкостенных трубок (см. рис. 7, *a–в*, 12, 14, 15, *a*), мелких частиц из соединений свинца (рис. 7, *z, d*, 10, *a*, 11) и других объектов сложной формы (рис. 3, 5, *a*, 6, *a*, 11, 16). Тонкостенные трубки состоят из следующего набора элементов: ${}^6\text{C}$, ${}^7\text{N}\uparrow$, ${}^8\text{O}$, ${}^9\text{F}\uparrow$, ${}^{12}\text{Mg}$, ${}^{13}\text{Al}$, ${}^{14}\text{Si}$, ${}^{15}\text{P}$, ${}^{16}\text{S}$, ${}^{17}\text{Cl}$, ${}^{18}\text{Ar}\uparrow$, ${}^{19}\text{K}$ и ${}^{20}\text{Ca}$.

МФ также претерпела изменения структуры поверхности. На ней появились нарушения типа эрозии поверхности (см. рис. 17, *a*), встречаются частицы малого размера ≈ 1 мкм (см. рис. 18, *a*), содержащие элементы O, Al, Si, S и Cl (в большом количестве — 11,99 вес. %, или 14,37 ат. %) и, возможно, свинец (см. рис. 18, *б* и 19 и табл. 6 и 7).

ЛС продуктов реакций оказался с сильно измененной центральной частью (вдоль оси ННРС) в виде пятна диаметром 621,7 мкм и другими аномалиями (частицами) на поверхности сборника (см. рис. 20, 22, *a*, 23, 24). Химический состав поверхности сборника не изменился (см. спектры на рис. 21, 22, *б*, 25 и табл. 8), но сильно изменилась ее структура: обнаружены образования в виде трубок, но с более сложными включениями (см. рис. 26, 28, 29, 31, *a*, 32, *a*, 33, *a*, 34, *a*, 40, 42, *a*), а также частицы (см. рис. 37, *a*, 38, 41, *a*, 44), состоящие из легких химических элементов: O, Mg, Al, Si, S, Cl, K, Ca и более тяжелых элементов, таких как железо. Помимо этого найдены мелкие частицы сферической формы из соединений свинца (см. рис. 36, *a*, 37 и 42, *б*).

РМЗА структур на поверхности ЛС показал во многих случаях изменение относительных концентраций цинка и меди с увеличением концентрации цинка, что отличается от их исходного соотношения в латуни (см. спектры на рис. 27 и табл. 9, рис. 30 и табл. 10, рис. 31, б и табл. 11, рис. 32, б, 33, б и табл. 12, рис. 34, б и табл. 13, рис. 35, б, 46, б и 40, б). Исходное соотношение меди и цинка 60 : 40 ат. % (см. рис. 21 и табл. 8, рис. 22, б, 25, 36, б, 37, б, 39, 41, б, 42, б). Отметим, что значительные отличия в этом соотношении от исходного отмечаются там, где присутствуют более или менее крупные частицы на поверхности ЛС.

Вызывает удивление обнаружение вольфрама в значительной концентрации — $69,17 \pm 4,35$ вес. %, или 30,55 ат. % (см. рис. 29, б, 30 и табл. 10), а также $0,71 \pm 0,19$ вес. %, или 0,10 ат. % (см. рис. 31, а, 31, б и табл. 11).

Интерпретация полученных результатов представляет значительные трудности ввиду обнаруженных экспериментальных аномалий. Можно предположить, что образование легких элементов, начиная с углерода, а возможно, и более легких происходит либо при делении более тяжелых элементов в ядерных реакциях с нейтронами, протонами и дейтронами (см. [15, 17]) — «нисходящие» реакции, либо путем реакций синтеза легких ядер в более тяжелые — «восходящие» реакции (см. [8, 9]). При этом обнаружение более тяжелых химических элементов в результате ядерных реакций с ядрами средних масс (см. [2–13, 15, 16]) свидетельствует о синтезе, т. е. о «восходящих» реакциях.

Установлено, что на срезе обеих половинок латунной втулки присутствуют мелкие вкрапления свинца и, возможно, олова [24]. Диффузионные процессы по выделению малых концентраций примесей и кластеризация подавлены [24]. Из этого факта следует, что эти ядра могли быть синтезированы из более легких ядер самой латуни, насыщенной водородом, в реакциях, которые упоминаются в работах [8, 9]. Образование же значительного количества легких элементов в составе крупных частиц и других структур, возможно, происходит, во-первых, при делении ядер средних масс и процессах при синтезе тяжелого элемента — свинца («нисходящие» реакции) (см. [15–17] и приведенные там ссылки), а во-вторых, при синтезе легких элементов в плотном водороде по соответствующим реакциям синтеза (см., например, циклы Бете: протон-протонный и углеродно-азотный [19–22]).

Приведем здесь перевод одного из положений в работе [22] (см. также [23]): «В расчетах звездных моделей часто используется так называемая смесь Рассела тяжелых элементов (*Russell-mixture of heavy elements*), которая представляет собой простейшее приближение к точным составам (*constitutions*) звезд. Эта смесь Рассела дается в виде 50% ^8O , 25% ^{11}Na и ^{12}Mg ; 6% ^{14}Si , 6% ^{19}K и ^{20}Ca , 13% ^{26}Fe и имеет средний эффективный молекулярный вес $\mu = 1,85$ ».

Можно сделать вывод, что в данной работе наблюдается похожий состав вновь образованных химических элементов в обеих синтезированных структурах и в других обнаруженных объектах (см. также [24]).

Помимо этого можно предположить, что в процессах могут принимать участие реакции, предложенные в работах [25, 26], т. е. так называемые ассоциированные ядерные реакции с участием третьей частицы в латуни, насыщенной водородом, и бериллиевой бронзе.

Атомные процессы при рассеянии γ -квантов и реакции с участием ядер водорода представлены конспективно в работе [17].

Ввиду того, что молекулярный водород содержит до 2 % дейтерия, возможны реакции с участием дейтерия, которые описаны в [15–17].

Для проверки методологии подхода с использованием ДНРС/ННРС, наполненных плотными газами водорода и дейтерия, было проведено несколько контрольных исследований по влиянию облучения γ -квантами и загрузки плотного газа:

а) облучение γ -квантами с энергией 10 МэВ в течение 10 ч при токе электронного пучка около 5–7 мкА ННРС/ДНРС, откаченных до вакуума 10^{-4} торр, но без металлического стержня;

б) загрузка ДНРС с Pd-стержнем и дейтерием до давления 3,5 кбар, выдерживание этого давления в течение 48 ч, разгрузка ННРС/ДНРС путем сбрасывания давления дейтерия до давления 1 атм. Повторение этой операции «загрузка-разгрузка» осуществляется три раза;

в) облучение образца (Pd-стержня) на воздухе γ -квантами с энергией 10 МэВ в течение 10 ч при токе электронного пучка около 5–7 мкА;

г) облучение γ -квантами с энергией 10 МэВ в течение 18 ч при токе электронного пучка около 10–11 мкА специализированных камер низкого давления иного вида, заполненных исследуемым веществом и водородом или дейтерием при давлении 65 бар, с монокристаллическими образцами $\text{Pd}_{0,9}\text{Ag}_{0,1}$ или мелкодисперсными порошками чистых (0,98 %) рения или никеля.

Исследования элементного состава всех поверхностей компонентов ННРС/ДНРС (см. рис. 1 в [1]), имеющих контакт с плотными газами, а именно: бериллиевого входного окна (поз. 4), Pd-стержней (поз. 9), латунных сборников продуктов реакций (поз. 12), манганиновых фольг (поз. 10), разрезанных поверхностей латунных втулок (поз. 8) и облученных материалов в камерах низкого давления — позволили установить отсутствие заметных изменений состава, наличия трещин и других эффектов.

В аналогичных условиях была облучена ННРС с Pd-стержнем внутри, но при давлении молекулярного водорода 0,5 кбар. Результаты, полученные в этих исследованиях и по п. г), будут в ближайшее время опубликованы.

В заключение авторы выражают признательность за полезные обсуждения ведущему научному сотруднику ЛЯР им. Г. Н. Флерова ОИЯИ В. А. Шеголеву, за активное участие в подготовке эксперимента научному сотруднику НЦЯИ

доктору Т. Вилчинска-Китовска, за облучение камеры ННРС γ -квантами А. Г. Белову, за СЭМ-исследования и РМЗА старшему научному сотруднику аналитического центра Научно-исследовательского института перспективных материалов МИЭМ А. И. Гайдар и научному сотруднику НИИЯФ им. Д. В. Скобельцына МГУ им. М. В. Ломоносова Д. В. Петрову.

В приложении 1 представлены реакции (γ, n) и (γ, p) на ядрах, входящих в компоненты материалов ННРС. Из их анализа можно сделать вывод, что в основном эти реакции не происходят при энергиях γ -квантов, использованных в работе, $E_\gamma = 10$ МэВ. В приложении 2 приведены реакции синтеза легких элементов из водорода.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Максимальная энергия, которую γ -квант с энергией E_γ способен передать атомам, имеет вид [17, 18]

$$T_M^{\max} = E_\gamma \left(1 + \frac{Mc^2}{2E_\gamma} \right), \quad (1)$$

где M — масса атома. Для атомов и молекул водорода максимальные переданные им γ -квантами с $E_\gamma = 10$ и 25 МэВ энергии составляют:

$$\begin{aligned} T_H^{\max} (10 \text{ МэВ}) &= 208,6 \text{ кэВ}, & T_{H_2}^{\max} (25 \text{ МэВ}) &= 1,264 \text{ кэВ}, \\ T_{H_2}^{\max} (10 \text{ МэВ}) &= 105,4 \text{ кэВ}, & T_{H_2}^{\max} (25 \text{ МэВ}) &= 665,5 \text{ кэВ}. \end{aligned} \quad (2)$$

Сечения прямого рассеяния γ -квантов на ядрах малы (см., например, [1, 18]). Но при взаимодействии γ -квантов с атомами мишени происходят не прямые процессы, такие как фотоэффект, эффект Комптона и рождение e^-e^+ -пар [18, 17], в результате которых образуются высокоэнергетические электроны и позитроны.

Как известно [19, 20], температура в центре Солнца $\bar{T} \approx 14$ МК, а плотность солнечной плазмы в центре $\rho \approx 100 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. Тогда средняя кинетическая энергия протонов в центре Солнца

$$\bar{E}_p = k\bar{T} = 1,206 \text{ кэВ}. \quad (3)$$

Высота кулоновского барьера реакции $p + p$ составляет примерно $B_k \approx 0,5$ МэВ, поэтому энерговыделение из Солнца осуществляется за счет перекрытия максвелловского распределения энергетического спектра водородной плазмы и возрастающего с увеличением энергии сечения подбарьерного слияния в реакции $p + p$ (см. [20]).

Максимальная энергия, переданная протонам в случае облучения водородной мишени γ -квантами с энергиями 10 и 25 МэВ (см. (2)), значительно превышает среднюю энергию протонов в центре Солнца (см. (3)).

Схемы «нисходящих» ядерных реакций при делении ядер средних масс под действием нейтронов, протонов и дейтронов описаны в работе [15]. Обсуждение подходов и возникающих вопросов, связанных с «восходящими» ядерными реакциями с образованием более тяжелых химических элементов, чем входящие в материалы ННРС/ДНРС, представлено в [8, 9]. Следует отметить, что если развиваемый подход правильный, то критерием той или иной «ветви» является изотопный состав элементов: в «нисходящих» реакциях должны образовываться преимущественно тяжелые изотопы элементов (как бы нейтронно-избыточные), а в «восходящих» — преимущественно легкие изотопы (как бы нейтронно-дефицитные).

Реакции (γ, n) и (γ, p) на ядрах, входящих в материалы компонентов ННРС

Реакции (γ, n) и (γ, p) на ядрах компонентов ННРС	Энергия реакции Q , МэВ	Схема распада или %-е содержание
$\gamma + {}^{63}_{29}\text{Cu} (69,17\%) \rightarrow {}^{62}_{29}\text{Cu} + n$	-10,8539	${}^{62}_{29}\text{Cu} \xrightarrow{\beta^+, 9,74 \text{ мин}} {}^{62}_{28}\text{Ni} (3,59\%)$
$\gamma + {}^{63}_{29}\text{Cu} (69,17\%) \rightarrow {}^{62}_{28}\text{Ni} + p$	-8,4559	${}^{62}_{28}\text{Ni} (3,59\%)$
$\gamma + {}^{65}_{29}\text{Cu} (30,83\%) \rightarrow {}^{64}_{29}\text{Cu} + n$	-9,9099	${}^{64}_{29}\text{Cu} \xrightarrow{\alpha, \beta^+, \beta^-} {}^{64}_{28}\text{Ni} (0,91\%); {}^{64}_{30}\text{Zn} (48,6\%)$
$\gamma + {}^{65}_{29}\text{Cu} (30,83\%) \rightarrow {}^{64}_{28}\text{Ni} + p$	-7,45269	${}^{64}_{28}\text{Ni} (48,6\%)$
$\gamma + {}^{64}_{30}\text{Zn} (48,6\%) \rightarrow {}^{63}_{30}\text{Zn} + n$	-11,8615	${}^{63}_{29}\text{Cu} (69,17\%)$
$\gamma + {}^{64}_{30}\text{Zn} (48,6\%) \rightarrow {}^{63}_{29}\text{Cu} + p$	-7,7117	${}^{63}_{29}\text{Cu} (69,17\%)$
$\gamma + {}^{66}_{30}\text{Zn} (27,9\%) \rightarrow {}^{65}_{30}\text{Zn} + n$	-11,7030	${}^{65}_{30}\text{Zn} \xrightarrow{\alpha, \beta^+} {}^{65}_{29}\text{Cu} (30,83\%)$
$\gamma + {}^{66}_{30}\text{Zn} (27,9\%) \rightarrow {}^{65}_{29}\text{Cu} + p$	-8,9258	${}^{65}_{29}\text{Cu} (30,83\%)$
$\gamma + {}^{67}_{30}\text{Zn} (4,1\%) \rightarrow {}^{66}_{30}\text{Zn} + n$	-9,0901	${}^{66}_{29}\text{Zn} (27,9\%)$
$\gamma + {}^{67}_{30}\text{Zn} (4,1\%) \rightarrow {}^{66}_{29}\text{Cu} + p$	-8,9119	${}^{66}_{29}\text{Cu} \xrightarrow{\beta^-, 5,19 \text{ мин}} \text{Zn} (27,9\%)$
$\gamma + {}^{68}_{30}\text{Zn} (18,8\%) \rightarrow {}^{67}_{30}\text{Zn} + n$	-10,1981	${}^{67}_{30}\text{Zn} (4,1\%)$

Окончание таблицы

Реакции (γ, n) и (γ, p) на ядрах компонентов ННРС	Энергия реакции Q , МэВ	Схема распада или %-е содержание
$\gamma + {}^{68}_{30}\text{Zn} (18,8\%) \rightarrow {}^{67}_{29}\text{Cu} + p$	-9,9903	${}^{67}_{29}\text{Cu} \xrightarrow{\beta^-, 61,92 \text{ ч}} {}^{67}_{30}\text{Zn} (4,1\%)$
$\gamma + {}^{70}_{30}\text{Zn} (0,6\%) \rightarrow {}^{69}_{30}\text{Zn} + n$	-9,2143	${}^{69}_{30}\text{Zn} \xrightarrow{\beta^-, 55,6 \text{ мин}} {}^{69}_{31}\text{Ga} (60,1\%)$
$\gamma + {}^{70}_{30}\text{Zn} (0,6\%) \rightarrow {}^{69}_{29}\text{Cu} + p$	-10,9089	${}^{69}_{29}\text{Cu} \xrightarrow{\beta^-, \beta^-} \text{Ga} (60,1\%)$
$\gamma + {}^{55}_{25}\text{Mn} (100\%) \rightarrow {}^{54}_{25}\text{Mn} + n$	-10,2271	${}^{54}_{25}\text{Mn} \xrightarrow{\text{э.з.}, 312,5 \text{ сут}} {}^{54}_{24}\text{Cr} (2,365\%)$
$\gamma + {}^{55}_{25}\text{Mn} (100\%) \rightarrow {}^{54}_{24}\text{Cr} + p$	-8,0677	${}^{54}_{24}\text{Cr} (2,365\%)$
$\gamma + {}^{58}_{28}\text{Ni} (68,71\%) \rightarrow {}^{57}_{28}\text{Ni} + n$	-12,1967	${}^{57}_{28}\text{Ni} \xrightarrow{\beta^+, \text{э.з.}} {}^{57}_{26}\text{Fe} (2,2\%)$
$\gamma + {}^{58}_{28}\text{Ni} (68,71\%) \rightarrow {}^{57}_{27}\text{Co} + p$	-8,1709	${}^{57}_{26}\text{Co} \xrightarrow{\text{э.з.}, 270,9 \text{ сут}} {}^{57}_{26}\text{Fe} (2,2\%)$
$\gamma + {}^{60}_{28}\text{Ni} (26,10\%) \rightarrow {}^{59}_{28}\text{Ni} + n$	-11,3887	${}^{59}_{28}\text{Ni}; 7,5 \cdot 10^4 \text{ лет}$
$\gamma + {}^{60}_{28}\text{Ni} (26,10\%) \rightarrow {}^{59}_{27}\text{Co} + p$	-9,5328	${}^{59}_{27}\text{Co} (100\%)$

Примечание. э. з. — электрозахват.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Реакции синтеза легких элементов и ядер средних масс из водорода и дейтерия

Реакция синтеза	Энергия реакции Q , МэВ	Схема распада или %-е содержание
$p + p \rightarrow d + e^- + \bar{\nu}_e$	+0,931228	Стабилен (0,015 %)
$p + d \rightarrow {}^3_2\text{He} + \gamma$	+5,4936	Стабилен (0,000138 %)
$d + d \rightarrow {}^4_2\text{He} + \gamma$	+23,8467	Стабилен (99,999862 %)
$p + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_3\text{Li} + \gamma$	-2,9096	${}^4_3\text{Li} \rightarrow {}^3_2\text{He} + p$

Продолжение таблицы

Реакция синтеза	Энергия реакции Q , МэВ	Схема распада или %-е содержание
$d + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^5_3\text{Li} + \gamma$	+11,680	${}^5_3\text{Li} \rightarrow {}^4_2\text{He} + p$
$p + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^5_3\text{Li} + \gamma$	-1,9660	${}^5_3\text{Li} \rightarrow {}^4_2\text{He} + p$
$d + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^6_3\text{Li} + \gamma$	-4,3733	Стабилен (7,5 %)
${}^3_2\text{He} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + \gamma$	+1,5862	${}^7_4\text{Be} \xrightarrow{\text{э.з., 53,44 сут}} {}^7_3\text{Li}$
$p + {}^7_3\text{Li} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + \gamma$	+17,2555	$\tau_{1/2} \approx 10^{-16}$ с
$d + {}^7_3\text{Li} \rightarrow {}^9_4\text{Be} + \gamma$	+16,6960	Стабилен (100 %)
$p + {}^9_4\text{Be} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + \gamma$	+6,5853	Стабилен (19,9 %)
$d + {}^9_4\text{Be} \rightarrow {}^{11}_5\text{B} + \gamma$	+15,8159	Стабилен (80,1 %)
$p + {}^{11}_5\text{B} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + \gamma$	+15,8159	Стабилен (98,90 %)
$d + {}^{11}_5\text{Be} \rightarrow {}^{13}_6\text{C} + \gamma$	+18,262	Стабилен (1,10 %)
$p + {}^{13}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + \gamma$	+0,5506	Стабилен (99,634 %)
$d + {}^{13}_6\text{C} \rightarrow {}^{15}_7\text{N} + \gamma$	+16,1594	Стабилен (0,366 %)
$p + {}^{15}_7\text{N} \rightarrow {}^{16}_8\text{O} + \gamma$	+12,1276	Стабилен (99,762 %)
$d + {}^{15}_7\text{N} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + \gamma$	+14,0473	Стабилен (0,038 %)
$p + {}^{17}_8\text{O} \rightarrow {}^{18}_9\text{F} + \gamma$	+5,6066	${}^{18}_9\text{F} \xrightarrow{\beta^+, \text{э.з., 109,77 мин}} {}^{18}_8\text{O}$ (0,200 %)
$d + {}^{17}_8\text{O} \rightarrow {}^{19}_9\text{F} + \gamma$	+13,8127	Стабилен (100 %)
$p + {}^{19}_9\text{F} \rightarrow {}^{20}_{10}\text{Ne} + \gamma$	+12,8447	Стабилен (90,51 %)
$d + {}^{19}_9\text{F} \rightarrow {}^{21}_{10}\text{Ne} + \gamma$	+17,3861	Стабилен (0,27 %)
$p + {}^{21}_{10}\text{Ne} \rightarrow {}^{22}_{11}\text{Na} + \gamma$	+6,7399	${}^{22}_{11}\text{Na} \xrightarrow{\beta^+, \text{э.з., 2,602 г.}} {}^{22}_{10}\text{Ne}$ (9,22 %)
$d + {}^{21}_{10}\text{Ne} \rightarrow {}^{23}_{11}\text{Na} + \gamma$	+16,9323	Стабилен (100 %)
$p + {}^{23}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{24}_{12}\text{Mg} + \gamma$	+11,6900	Стабилен (78,99 %)
$d + {}^{23}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{25}_{12}\text{Mg} + \gamma$	+16,7970	Стабилен (10,00 %)
$p + {}^{25}_{12}\text{Mg} \rightarrow {}^{26}_{13}\text{Al} + \gamma$	+6,3058	${}^{26}_{13}\text{Al} \xrightarrow{\beta^+, \text{э.з., } 7,2 \cdot 10^5 \text{ лет}} {}^{26}_{12}\text{Mg}$ (11,01 %)
$d + {}^{25}_{12}\text{Mg} \rightarrow {}^{27}_{13}\text{Al} + \gamma$	+17,1393	Стабилен (100 %)
$p + {}^{27}_{13}\text{Al} \rightarrow {}^{28}_{14}\text{Si} + \gamma$	+11,5859	Стабилен (92,23 %)

Продолжение таблицы

Реакция синтеза	Энергия реакции Q , МэВ	Схема распада или %-е содержание
$d + {}^{27}_{13}\text{Al} \rightarrow {}^{29}_{14}\text{Si} + \gamma$	+17,8352	Стабилен (4,67 %)
$p + {}^{29}_{14}\text{Si} \rightarrow {}^{30}_{15}\text{P} + \gamma$	+5,5998	${}^{30}_{15}\text{P} \xrightarrow{\beta^+, 2,498 \text{ мин}} {}^{30}_{14}\text{Si}$ (3,10 %)
$d + {}^{29}_{14}\text{Si} \rightarrow {}^{31}_{15}\text{P} + \gamma$	+15,6816	Стабилен (100 %)
$p + {}^{31}_{15}\text{P} \rightarrow {}^{32}_{16}\text{S} + \gamma$	+8,8646	Стабилен (95,02 %)
$d + {}^{31}_{15}\text{P} \rightarrow {}^{33}_{16}\text{S} + \gamma$	+15,2822	Стабилен (0,75 %)
$p + {}^{33}_{16}\text{S} \rightarrow {}^{34}_{17}\text{Cl} + \gamma$	+5,1414	${}^{34}_{17}\text{Cl} \xrightarrow{\beta^+, 1,529 \text{ с}} {}^{34}_{16}\text{S}$ (4,21 %)
$d + {}^{33}_{16}\text{S} \rightarrow {}^{35}_{17}\text{Cl} + \gamma$	+15,5637	Стабилен (75,77 %)
$p + {}^{35}_{17}\text{Cl} \rightarrow {}^{36}_{18}\text{Ar} + \gamma$	+8,5066	Стабилен (0,337 %)
$d + {}^{35}_{17}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}_{18}\text{Ar} + \gamma$	+15,0700	${}^{37}_{18}\text{Ar} \xrightarrow{\text{э.з.}, 34,8 \text{ сут}} {}^{37}_{17}\text{Cl}$ (24,23 %)
$p + {}^{37}_{18}\text{Ar} \rightarrow {}^{38}_{19}\text{K} + \gamma$	+5,1431	${}^{38}_{19}\text{K} \xrightarrow{\text{э.з.}, 7,636 \text{ мин}} \text{Ar}$ (0,063 %)
$d + {}^{37}_{18}\text{Ar} \rightarrow {}^{39}_{19}\text{K} + \gamma$	+15,9941	Стабилен (93,2581 %)
$p + {}^{39}_{19}\text{K} \rightarrow {}^{40}_{20}\text{Ca} + \gamma$	+8,3296	Стабилен (96,941 %)
$d + {}^{39}_{19}\text{K} \rightarrow {}^{41}_{20}\text{Ca} + \gamma$	+14,4681	${}^{41}_{20}\text{Ca} \xrightarrow{\text{э.з.}, 1,4 \cdot 10^5 \text{ лет}} {}^{41}_{19}\text{K}$ (6,7302 %)
$p + {}^{41}_{20}\text{Ca} \rightarrow {}^{42}_{21}\text{Sc} + \gamma$	+4,2712	${}^{42}_{21}\text{Sc} \xrightarrow{\text{э.з.}, 0,6739 \text{ с}} {}^{42}_{20}\text{Ca}$ (0,647 %)
$d + {}^{41}_{20}\text{Ca} \rightarrow {}^{43}_{21}\text{Sc} + \gamma$	+14,1823	${}^{43}_{21}\text{Sc} \xrightarrow{\beta^+, 3,891 \text{ ч}} {}^{43}_{20}\text{Ca}$ (0,135 %)
$p + {}^{43}_{21}\text{Sc} \rightarrow {}^{44}_{22}\text{Ti} + \gamma$	+8,6502	${}^{44}_{22}\text{Ti} \xrightarrow{\text{э.з.}, 47,3 \text{ г.}; \beta^+, 3,927 \text{ ч}} {}^{44}_{20}\text{Ca}$ (0,135 %)
$d + {}^{43}_{21}\text{Sc} \rightarrow {}^{45}_{22}\text{Ti} + \gamma$	+15,9548	${}^{45}_{22}\text{Ti} \xrightarrow{\beta^+, 184,8 \text{ г.}} {}^{45}_{23}\text{Sc}$ (100 %)
$p + {}^{45}_{22}\text{Ti} \rightarrow {}^{46}_{23}\text{V} + \gamma$	+5,3558	${}^{46}_{23}\text{V} \xrightarrow{\beta^+, 0,4223 \text{ с}} {}^{46}_{22}\text{Ti}$ (8,0 %)
$d + {}^{45}_{22}\text{Ti} \rightarrow {}^{47}_{23}\text{V} + \gamma$	+16,1329	${}^{47}_{23}\text{V} \xrightarrow{\beta^+, 32,6 \text{ мин}} {}^{47}_{22}\text{Ti}$ (7,3 %)
$p + {}^{47}_{22}\text{Ti} \rightarrow {}^{48}_{23}\text{V} + \gamma$	+6,8308	${}^{48}_{23}\text{V} \xrightarrow{\beta^+, 15,97 \text{ сут}} {}^{48}_{22}\text{Ti}$ (73,8 %)
$d + {}^{41}_{20}\text{Ca} \rightarrow {}^{43}_{21}\text{Sc} + \gamma \xrightarrow{\beta^+, 3,891 \text{ ч}} {}^{43}_{20}\text{Ca}$	+14,1823	Продление цепочки дальше
$d + {}^{43}_{20}\text{Ca} \rightarrow {}^{45}_{21}\text{Sc} + \gamma$	+15,7969	Стабилен (100 %)
$d + {}^{45}_{21}\text{Sc} \rightarrow {}^{47}_{22}\text{Ti} + \gamma$	+17,0003	Стабилен (7,3 %)
$d + {}^{47}_{22}\text{Ti} \rightarrow {}^{49}_{23}\text{V} + \gamma$	+16,1617	${}^{49}_{23}\text{V} \xrightarrow{\text{э.з.}, 330 \text{ сут}} {}^{49}_{22}\text{Ti}$ (5,5 %)

Окончание таблицы

Реакция синтеза	Энергия реакции, МэВ	Схема распада или % содержание
$p + {}^{49}_{23}\text{V} \rightarrow {}^{50}_{24}\text{Cr} + \gamma$	+9,5901	Стабилен (4,345 %)
$d + {}^{49}_{23}\text{V} \rightarrow {}^{51}_{24}\text{Cr} + \gamma$	+16,6267	${}^{51}_{24}\text{Cr} \xrightarrow{\text{э.з., } 27,704 \text{ сут}} {}^{51}_{23}\text{V}$ (99,750 %)
$d + {}^{51}_{24}\text{Cr} \rightarrow {}^{53}_{25}\text{Mn} + \gamma$	+16,3754	${}^{53}_{25}\text{Mn} \xrightarrow{\text{э.з., } 3,7 \cdot 10^6 \text{ лет}} {}^{53}_{24}\text{Cr}$ (9,501 %)
$d + {}^{53}_{25}\text{Mn} \rightarrow {}^{55}_{26}\text{Fe} + \gamma$	+12,9270	${}^{55}_{26}\text{Fe} \xrightarrow{\text{э.з., } 2,7 \text{ г.}} {}^{55}_{25}\text{Cr}$ (100 %)
$d + {}^{55}_{26}\text{Fe} \rightarrow {}^{57}_{27}\text{Co} + \gamma$	+14,9996	${}^{57}_{27}\text{Co} \xrightarrow{\text{э.з., } 270,9 \text{ сут}} {}^{57}_{26}\text{Fe}$ (2,2 %)
$d + {}^{57}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{59}_{28}\text{Ni} + \gamma$	+14,9463	${}^{59}_{28}\text{Ni} \xrightarrow{\text{э.з., } 7,5 \cdot 10^4 \text{ лет}} {}^{59}_{27}\text{Co}$ (100 %)
$d + {}^{59}_{28}\text{Ni} \rightarrow {}^{61}_{29}\text{Cu} + \gamma$	+13,9636	${}^{61}_{29}\text{Cu} \xrightarrow{\beta^+, \text{э.з., } 3,408 \text{ ч}} {}^{61}_{28}\text{Ni}$ (1,13 %)
$d + {}^{61}_{29}\text{Cu} \rightarrow {}^{63}_{30}\text{Zn} + \gamma \xrightarrow{\beta^+, \text{э.з.}} {}^{63}_{29}\text{Cu}$	+13,3662	${}^{63}_{30}\text{Zn} \xrightarrow{\beta^+, \text{э.з., } 38,1 \text{ мин}} {}^{63}_{29}\text{Cu}$ (69,17 %)
$d + {}^{59}_{28}\text{Ni} \rightarrow {}^{61}_{29}\text{Cu} + \gamma \xrightarrow{\beta^+, 3,408 \text{ ч}} {}^{61}_{28}\text{Ni}$	+13,9636	Стабилен (1,13 %)
$d + {}^{61}_{28}\text{Ni} \rightarrow {}^{63}_{29}\text{Cu} + \gamma$	+14,4952	Стабилен (69,17 %)

Примечание. э. з. — электрозахват.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ишханов Б. С., Капитонов И. М. Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами. М.: Изд-во МГУ, 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. 22001-P1–22001-P6.
3. Didyk A. Yu., Wiśniewski R. Nuclear Reactions in Deuterium-Saturated Palladium under Irradiation by 10 MeV γ -Quanta in Dense Molecular Deuterium at 1.2 kbar Pressure // Eur. Phys. Lett. 2013. V. 103. P. 42002-P1–42002-P6.
4. 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.
5. Дидык А. Ю., Вишневецкий Р. Синтез новых структур в плотном газообразном дейтерии и насыщенном дейтерием палладии при ядерных реакциях, инициирован-

- ных γ -квантами // Физика и химия обработки материалов. 2012. №5. С. 5–13; Препринт ОИЯИ P15-2012-50. Дубна, 2012.
6. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R., Wilczynska-Kitowska T.* Deuteron Disintegration, Thermonuclear and Nuclear Fission Reactions Induced by γ -Quanta in D-Saturated Palladium and Dense Deuterium Gas with Synthesis of New Structures // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2013. V. 7, No. 2. P. 239–247.
 7. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Synthesis of New Structures in Dense Deuterium Gas and Deuterated Palladium under Nuclear Reactions Induced by γ Quanta // Inorganic Materials: Applied Research. 2013. V. 4, No. 3. P. 5–13.
 8. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R., Wilczynska-Kitowska T.* Changes of Surface Structure and Elemental Composition of Pd Rod and Collector of Nuclear Reaction Products Irradiated with 10-MeV γ -Quanta in Dense Deuterium Gas // Phys. Part. Nucl. Lett. 2013. V. 10, No. 7. P. 804–819; JINR Preprint P15-2013-15. Dubna, 2013. 34 p.
 9. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R., Wilczynska-Kitowska T.* Changes of Surface Structure and Elemental Composition of Components of Deuterium High-Pressure Chamber with Pd Rod inside Irradiated with 10-MeV γ -Quanta in Dense Deuterium Gas // Phys. Part. Nucl. Lett. 2013. V. 10, No. 7. P. 820–832; JINR Preprint P15-2013-20. Dubna, 2013. 29 p.
 10. *Дидык А. Ю., Вишневский Р.* Ядерные реакции в насыщенном дейтерием паллади 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. 603–621; Препринт ОИЯИ P15-2012-63. Дубна, 2012.
 11. *Дидык А. Ю., Вишневский Р.* Изменения поверхности, объемных свойств образцов ванадия и нержавеющей стали, облученных в плотном газообразном дейтерии γ -квантами с пороговой энергией 23 МэВ. Препринт P15-2012-75. Дубна, 2012.
 12. *Дидык А. Ю., Вишневский Р.* Результаты по облучению алюминия и гомогенного сплава YMn_2 γ -квантами с энергией 23 МэВ в атмосфере молекулярного дейтерия при давлении 2 кбар. Препринт ОИЯИ P15-2013-41. Дубна, 2013; Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 2(186). С. 278–292.
 13. *Дидык А. Ю., Вишневский Р.* Результаты по облучению нержавеющей стали и меди γ -квантами с энергией 23 МэВ в атмосфере молекулярного дейтерия при давлении 2 кбар. Препринт ОИЯИ P15-2013-42. Дубна, 2013; Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 3(187). С. 491–512.
 14. *Дидык А. Ю., Вишневский Р., Вилчинска-Китовска Т.* Устройство для получения энергии. Патент на полезную модель № 122197 от 21 июня 2012 г.
 15. *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. 283–287; JINR Preprint E15-2012-35. Dubna, 2012.
 16. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Properties of Hydrogen and Its Isotopes under High Pressure, and Technological Applications. Dubna: JINR, 2013. 320 p.

17. Дидык А. Ю., Вишневецкий Р. Изменения структуры и элементного состава Рд-стержня и сборника продуктов реакций, облученных 10-МэВ тормозными γ -квантами в молекулярном водороде при давлении 2,5 кбар. Препринт ОИЯИ Р15-2013-80. Дубна, 2013; Письма в ЭЧАЯ. 2014 (в печати).
18. Углов В. В. Радиационные эффекты в твердых телах. Минск: БГУ, 2011. 207 с.
19. Ишханов Б. С., Капитонов И. М., Тутынь И. А. Нуклеосинтез во Вселенной. М.: Либроком, 2009; <http://nuclphysinpmsuru/nuclsynth.html>.
20. Мухин К. Н. Экспериментальная ядерная физика. Т. 1. Физика атомного ядра. М.: Энергоатомиздат, 1983. С. 590–593.
21. Bethe H. A. Energy Production // Stars. Phys. Rev. 1939. V. 55. P. 434–456.
22. Gamov G. Nuclear Energy Sources and Stellar Evolution // Phys. Rev. 1938. V. 53. P. 595–604.
23. Marshak R. E., Morse P. M., York H. Equation of State of Hydrogen, Helium, and Russel Mixture at High Temperatures and Pressures // Astrophys. J. 1950. V. 111. P. 214–220.
24. Дидык А. Ю., Вишневецкий Р. Ядерные реакции синтеза и изменения структуры и химического состава поверхностей элементов ННРС, облученных 10-МэВ тормозными γ -квантами в молекулярном водороде при давлении 1 кбар (часть 2). Препринт ОИЯИ Р15-2014-3. Дубна, 2014; Письма в ЭЧАЯ. 2014 (в печати).
25. Kálmán P., Keszthelyi T. Solid State Internal Conversion // Phys. Rev. C. 2004. V. 69. 031606(R). P. 031606-1–031606-3.
26. Kálmán P., Keszthelyi T. Lattice Effect in Solid State Internal Conversion // Phys. Rev. C. 2009. V. 79. 031602(R). P. 031602-1–031606-4.

Получено 23 января 2014 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 24.03.2014.

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

Усл. печ. л. 2,7. Уч.-изд. л. 3,2. Тираж 225 экз. Заказ № 58227.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/