

P15-2015-79

А. Ю. Дидык, Р. Вишневски¹

**СИНТЕЗ НОВЫХ СТРУКТУР, ОБРАЗОВАННЫХ
В РЕЗУЛЬТАТЕ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ
В **ННРС** С ДАВЛЕНИЕМ ВОДОРОДА 3,4 кбар,
ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ТОРМОЗНЫМИ γ -КВАНТАМИ
С ПОРОГОВОЙ ЭНЕРГИЕЙ 10 МэВ**

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

¹ Варшавский политехнический университет, Варшава

Дидык А. Ю., Вишневецки Р.

P15-2015-79

Синтез новых структур, образованных в результате ядерных реакций в ННРС с давлением водорода 3,4 кбар, при облучении тормозными γ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ

Камера высокого давления водорода (ННРС) при давлении 3,4 кбар была облучена тормозными γ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ в течение $2,23 \cdot 10^5$ с. При сбросе давления из ННРС выпала одна крупная синтезированная микрочастица, которая отделилась от стенки реакционной камеры. Были проведены детальные исследования элементного состава и структуры всех обнаруженных микрообъектов на всех внутренних поверхностях компонентов ННРС. В результате при облучении ННРС тормозными γ -квантами произошли ядерные реакции с образованием легких элементов от углерода до металлов средних масс, а также более тяжелых, например бария. Обсуждаются возможные «восходящие» (с синтезом элементов из более легких) и «нисходящие» (с делением более тяжелых ядер на более легкие элементы) ядерные реакции.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2015

Didyk A. Yu., Wiśniewski R.

P15-2015-79

New Structures Synthesized by Nuclear Reactions in HHPC with a Hydrogen Pressure of 3.4 kbar under Irradiation by Braking γ -Rays with a Threshold Energy of 10 MeV

A hydrogen high-pressure chamber (HHPC) at a pressure of 3.4 kbar was irradiated by braking γ -rays with a threshold energy of 10 MeV during $2.23 \cdot 10^5$ s. When the pressure in the HHPC dropped, one synthesized microparticle separated from the reaction chamber wall. Detailed studies were carried out of the elemental composition and structure of the microscopic objects found over the internal surfaces of the HHPC components. As a result of nuclear reactions during the HHPC irradiation by braking γ -rays, nuclear reactions occurred with the formation of light elements from carbon to medium-weight metals, as well as heavier ones, such as barium. We discuss the possible upward (with the synthesis of elements from lighter to heavier ones) and downstream (fission of heavier nuclei into lighter elements) nuclear reactions.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2015

ВВЕДЕНИЕ

В предыдущих работах авторов этой статьи были исследованы процессы образования новых химических элементов в камере высокого давления водорода (ННРС) при давлении 2,5 кбар с палладиевым стержнем внутри [1]. Затем в другом эксперименте давление внутри ННРС было уменьшено до 0,5 кбар, по-прежнему с палладиевым стержнем внутри, при значительно увеличенном времени облучения тормозными γ -квантами, а также была обнаружена, помимо значительного количества синтезированных объектов из вновь образованных элементов, частица размером около 1 мм, имеющая сложный состав [2, 3]. В работах [4, 5] представлены результаты облучения ННРС при давлении 1,1 кбар без палладиевого стержня с заменой материалов внутри ННРС на особо чистую медь. В них описываются структура и элементный состав двух синтезированных частиц из десятка произведенных, а также множественные объекты на внутренних поверхностях реакционной камеры и сборника продуктов ядерных и химических реакций (см. рис. 1 ниже).

В работах [6, 7] описаны результаты рентгеновского микрозондового анализа (РМЗА) крупных углеродных фольг и других объектов, которые были синтезированы в ННРС при давлении гелия 1,1 кбар под действием тормозных γ -квантов с пороговой энергией 10 МэВ.

Цель настоящей работы — исследование влияния облучения тормозными γ -квантами ННРС с молекулярным водородом внутри при высоком давлении 3,4 кбар на образование новых синтезированных объектов и определение их элементного состава.

1. ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ОБЛУЧЕНИЯ γ -КВАНТАМИ И ПАРАМЕТРОВ ННРС

На рис. 1 представлена схема модифицированной камеры высокого давления, заполненной водородом при давлении 3,4 кбар в процессе облучения γ -квантами. При этом наполнение внутренней камеры ННРС с объемом менее 1 см³ водородом осуществлялось трехкратным повторением операции:

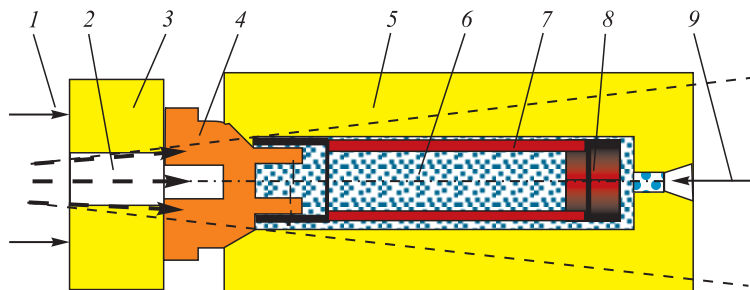


Рис. 1. Элементы камеры высокого давления водорода (ННРС), использованные при ее облучении γ -квантами: 1 — винтовое прижимное уплотнение (конус $60^\circ/58^\circ$ из $\text{Cu}_{1-x}\text{Be}_x$, $x = 2-4$ ат. %), которое не показано на этом рисунке; 2 — поток γ -квантов с проходным сечением в 6 мм; 3 — входное окно из $\text{Cu}_{1-x}\text{Be}_x$, в которое вставляется прижимной винт; 4 — входное окно γ -квантов; 5 — камера высокого давления из $\text{Cu}_{1-x}\text{Be}_x$ с внешним стальным цилиндром, который не показан на рисунке; 6 — водород; 7 — медная реакционная камера (99,99 %); 8 — медный сборник продуктов реакции, закрывающий реакционную камеру; 9 — устройство для загрузки-разгрузки газа и измерения его давления при контроле и в процессе облучения

заполнение камеры водородом до давления 150 бар, сброс давления до атмосферного и опять заполнение водородом до 150 кбар. При этом степень очистки от атмосферных газов составляет примерно $(1/150)^3 \approx 3 \cdot 10^{-7}$.



Рис. 2. Фотография черной частицы, полученная с использованием специального приспособления для микросъемки

Модификация ННРС заключалась в двух важных изменениях: 1) уплотнение из витона в месте соединения входного окна (ВО) для γ -квантов (рис. 1, поз. 4) и камеры высокого давления из бериллиевой бронзы ($\text{Cu}_{98-96}\text{Be}_{2-4}$, далее ББ) (рис. 1, поз. 5) было заменено на уплотнение металл по металлу из ББ (рис. 1, поз. 1); 2) реакционная камера (РК-М, рис. 1, поз. 7) и сборник продуктов реакций (СБ-М, рис. 1, поз. 8) были изготовлены из меди высокой чистоты (99,99 %). Это позволило ограничить присутствие химических элементов в ВО, в РК-М, СБ-М только медью и бериллием (до 2–4 ат. %). Исходное давление в ННРС перед облучением, измеренное с использованием внутреннего тензор-датчика (см. рис. 1, поз. 9) и измерительного модуля (Model P3 Strain indicator and recorder), оказалось равным 3,4 кбар и после заполнения водородом держалось более двух недель без

изменений. При давлении водорода около 3,4 кбар его атомную плотность можно оценить как $2,87 \cdot 10^{22}$ молекул $\text{H} \cdot \text{см}^{-3}$ [10].

Облучение ННРС было проведено в течение $2,23 \cdot 10^5$ с (58 ч 25 мин) на ускорителе электронов МТ-25 Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова. Энергия электронного пучка составляла 10 МэВ при токе пучка электронов от 20 до 24 мкА. Тормозные γ -кванты непрерывного спектра с граничной энергией примерно 10 МэВ были получены с использованием тормозной мишени в виде вольфрамовой фольги толщиной 2,5 мм и алюминиевого поглотителя электронного пучка толщиной 25 мм. При облучении в стационарном режиме температура на поверхности камеры высокого давления из $\text{Cu}_{98-96}\text{Be}_{2-4}$ (рис. 1, поз. 5) внутри защитной оболочки ННРС составляла около 60°C .

При вскрытии камеры давление в ней составило примерно 230 бар. Внутри ННРС была обнаружена одна частица черного цвета. Фотография этой частицы, сделанная с использованием специального приспособления для микросъемки, представлена на рис. 2. Эта частица была исследована на растровом электронном микроскопе (РЭМ) с использованием рентгеновского микрозондового анализа (РМЗА), и оказалось, что она состоит преимущественно из углерода.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РЭМ- И РМЗА-ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Аномалии на входном окне из бериллиевой бронзы. Для большей достоверности РЭМ- и РМЗА-исследования проводились в двух независимых центрах — в лаборатории структурных исследований НИИЯФ им. Д. В. Скобельцына МГУ и аналитическом центре НИИПМ ФБГУП, что

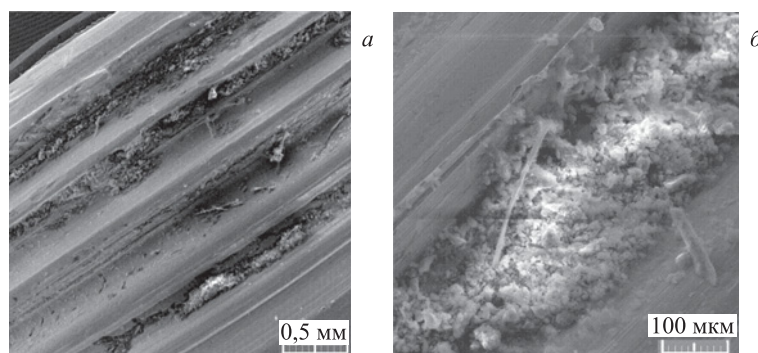


Рис. 3. РЭМ-изображения с разным увеличением участка поверхности ВО в месте расположения резьбы: 103 X (а) и 533 X (б)

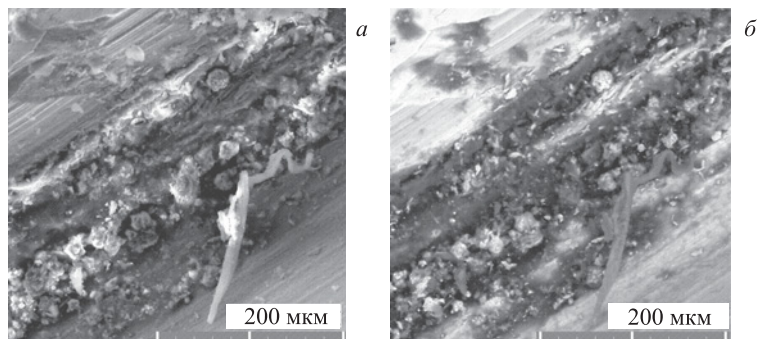


Рис. 4. РЭМ-изображения во вторичных (а) и в отраженных электронах (б) участка поверхности ВО в месте расположения резьбы

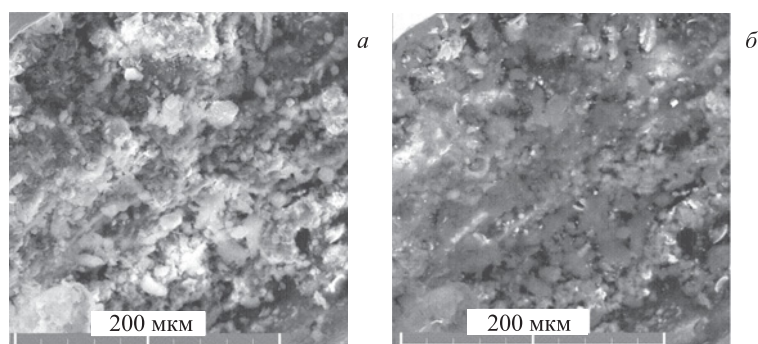


Рис. 5. РЭМ-изображения во вторичных (а) и в отраженных электронах (б) участка поверхности ВО в области резьбы, покрытого плотно расположенными мелкими частицами

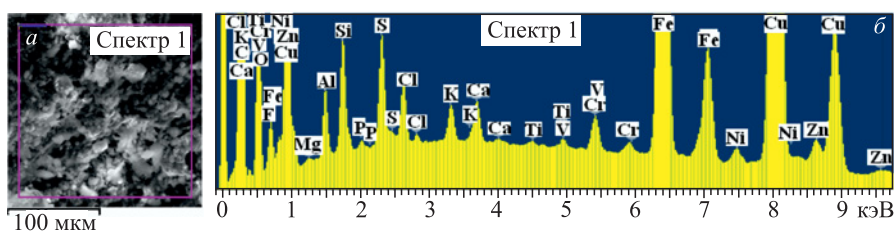


Рис. 6. РЭМ-изображение с выделенной областью площадью 184×184 мкм (а), в которой был сделан РМЗА (спектр 1) (б)

хорошо видно из представленных РЭМ-изображений и спектров характеристического рентгеновского излучения (СХРИ).

На рис. 3 показаны РЭМ-изображения: резьбы на ВО (при увеличении 103 X) (а) и впадины на резьбе, покрытой мелкодисперсными частицами (при увеличении 533 X) (б). Сброс давления в ННПС осуществляется отвинчиванием прижимной гайки и быстрым нарушением уплотнения, поэтому быстрый сброс давления может приводить к выносу частиц со стенок РК-М в места, где они могут собираться во впадинах — это резьба.

На рис. 4 представлены РЭМ-изображения во вторичных (а) и в отраженных электронах (б) участка поверхности ВО в области резьбы. На переднем плане присутствует структура в виде микротрубки. Увеличение здесь 779 X.

На рис. 5 приведены РЭМ-изображения во вторичных (а) и в отраженных электронах (б) участка поверхности ВО в области резьбы, покрытого плотно расположенными мелкими частицами. Увеличение на этих изображениях $1,25 \cdot 10^3$ X.

На рис. 6 представлено РЭМ-изображение с выделенной областью площадью 184×184 мкм (а), в которой был сделан РМЗА, а также СХРИ (спектр 1) (б). В табл. 1 показан соответствующий элементный состав.

Таблица 1. Элементный состав поверхности ВО в выделенной области (спектр 1) на рис. 6, а, соответствующий СХРИ на рис. 6, б

Элемент	Z	Серия	C, вес. %	C, ат. %
Кислород	8	К	24,69	50,78
Фтор	9	К	2,57	4,45
Магний	12	К	0,20	0,27
Алюминий	13	К	2,38	2,90
Кремний	14	К	2,86	3,36
Фосфор	15	К	0,24	0,26
Сера	16	К	2,04	2,09
Хлор	17	К	1,07	1,00
Калий	19	К	0,52	0,44
Кальций	20	К	0,56	0,46
Титан	22	К	0,04	0,03
Ванадий	23	К	0,14	0,09
Хром	24	К	0,62	0,40
Железо	26	К	18,67	11,00
Никель	28	К	0,48	0,27
Медь	29	К	41,89	21,69
Цинк	30	К	1,02	0,52

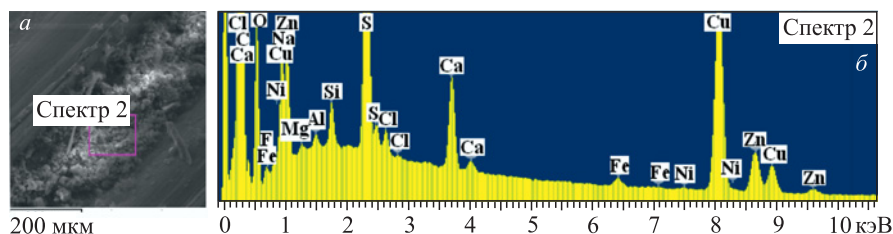


Рис. 7. РЭМ-изображение с выделенной областью площадью 134×114 мкм (а), в которой был сделан РМЗА (спектр 2) (б)

Таблица 2. Элементный состав поверхности ВО в выделенной области (спектр 2) на рис.7,а, соответствующий СХРИ на рис.7,б

Элемент	Z	Серия	C, вес. %	C, ат. %
Кислород	8	К	39,64	59,50
Фтор	9	К	7,92	10,02
Натрий	11	К	3,37	3,52
Магний	12	К	0,71	0,71
Алюминий	13	К	0,81	0,72
Кремний	14	К	2,13	1,82
Сера	16	К	14,85	11,12
Хлор	17	К	1,10	0,74
Кальций	20	К	3,33	1,99
Железо	26	К	0,47	0,20
Никель	28	К	0,11	0,05
Медь	29	К	20,59	7,78
Цинк	30	К	4,97	1,83

Из табл. 1 видно, что в выделенной области присутствует в больших количествах железо ($18,67^{*1}$ вес. %) наряду с кислородом ($50,78^{*}$ ат. %), а также алюминий ($2,90^{*}$ ат. %), кремний ($3,36^{*}$ ат. %), сера ($2,09^{*}$ ат. %). Обратим особое внимание на наличие фтора ($4,45^{*}$ ат. %), который может находиться только в химически связанном состоянии. Обнаружены также металлы: титан ($0,03^{*}$ ат. %), ванадий ($0,09^{*}$ ат. %), хром ($0,40^{*}$ ат. %), никель ($0,27$ ат. %) и цинк ($0,52^{*}$ ат. %). В разд. 3 эти элементы и реакции, по которым они могли быть получены, будут обсуждены.

¹В табл. 1 и 2 при обработке СХРИ на рис. 6,б и 7,б углерод был удален для того, чтобы можно было проследить остальные элементы, линии которых присутствуют в спектре, но «забиваются» углеродом, обнаруженным в больших количествах. Поэтому данные по элементному составу носят относительный характер. Такие значения пометим верхним индексом «*».

На рис. 7 представлено РЭМ-изображение с выделенной областью площадью 134×114 мкм (а), в которой был сделан РМЗА (спектр 2), а также СХРИ (б). В табл. 2 приведен соответствующий элементный состав.

Как видно, здесь также присутствует фтор (10,02* ат. %), натрий (3,52* ат. %), сера (11,12 ат. %), кальций (1,99 ат. %), а также железо (0,20* ат. %), никель (0,05* ат. %) и цинк (1,83* ат. %).

На рис. 8 приведены РЭМ-изображения ВО с заглаблением в центре (а) и с большим увеличением стенки ВО с нитями, которые как бы растут из нее (б).

На рис. 9, а представлено РЭМ-изображение торцевой части ВО с частицей, в т. 17 которой сделан РМЗА, на рис. 9, б — СХРИ. В табл. 3 приведен элементный состав в т. 17.

На рис. 10 показаны два РЭМ-изображения протяженных тонких нитей, быстро прогорающих под действием пучка электронов с энергией 20 кэВ,

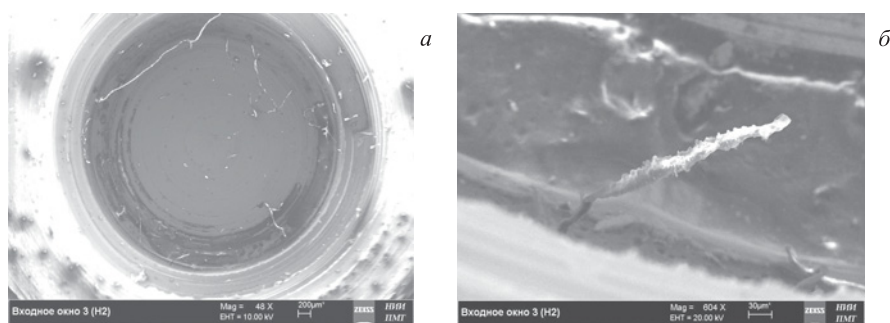


Рис. 8. РЭМ-изображения заглабления в центре ВО (а) и стенки ВО с растущими из нее нитями (б)

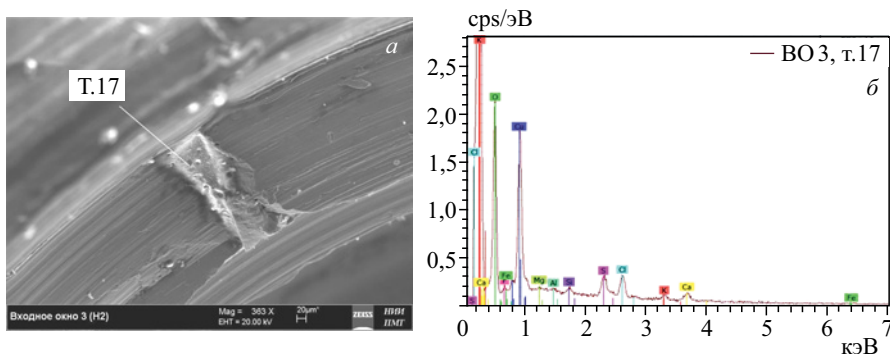


Рис. 9. РЭМ-изображение торцевой части ВО с частицей (а), в т. 17 которой сделан РМЗА, и соответствующий СХРИ (б)

Таблица 3. Элементный состав частицы на торце ВО, в т. 17 которой сделан РМЗА, соответствующий СХРИ на рис. 9, б

Элемент	Z	Серия	C, вес. %	C, ат. %
Углерод	6	К	54,84 ± 6,52	65,84
Кислород	8	К	34,01 ± 4,35	30,65
Фтор	9	К	1,22 ± 0,32	0,93
Магний	12	К	0,04 ± 0,03	0,02
Алюминий	13	К	0,02 ± 0,03	0,01
Кремний	14	К	0,05 ± 0,03	0,03
Сера	16	К	0,48 ± 0,05	0,21
Хлор	17	К	0,59 ± 0,05	0,24
Калий	19	К	0,17 ± 0,03	0,06
Кальций	20	К	0,31 ± 0,04	0,11
Железо	26	К	0,09 ± 0,03	0,02
Медь	29	К	8,18 ± 0,26	1,86

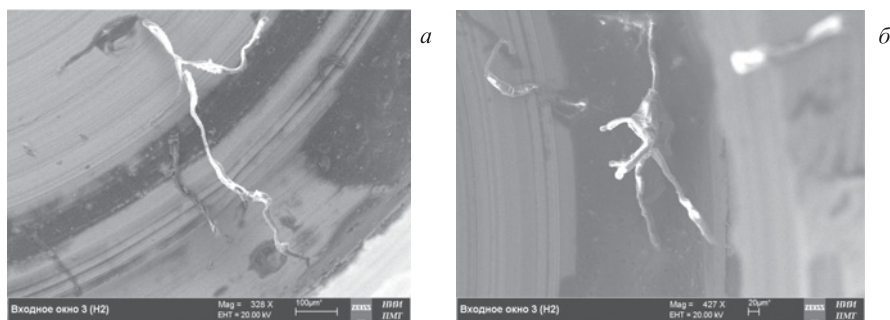


Рис. 10. РЭМ-изображения разветвленных протяженных тонких нитей, которые расположены в заглиблении ВО

которые расположены в заглиблении ВО. Скорее всего, эти нити представляют собой что-то типа полимеров, т. е. структур из углеводов, но водород мы регистрировать не можем.

На рис. 11 приведены два РЭМ-изображения с разным увеличением одного объекта в виде стержня длиной и диаметром примерно 100 мкм и 15 мкм соответственно. При попытке сделать РМЗА при наборе СХРИ в месте попадания пучка электронов с энергией 20 кэВ образец сжался.

На рис. 12 представлены два РЭМ-изображения со сложными переплетениями двух объектов значительных размеров.

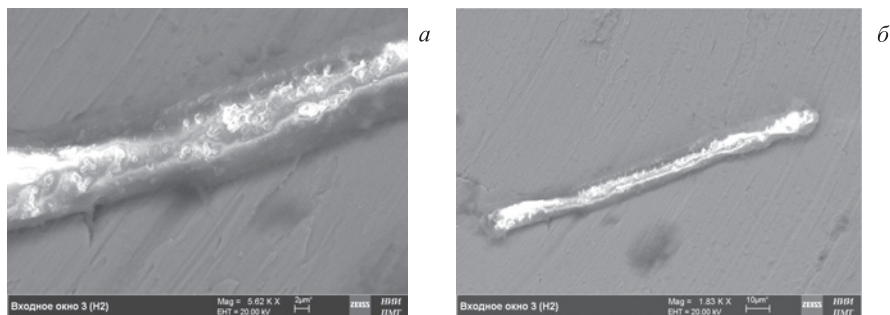


Рис. 11. РЭМ-изображения одного объекта в виде стержня: при увеличении 5,62X (*a*) и 1,83 X (*б*)

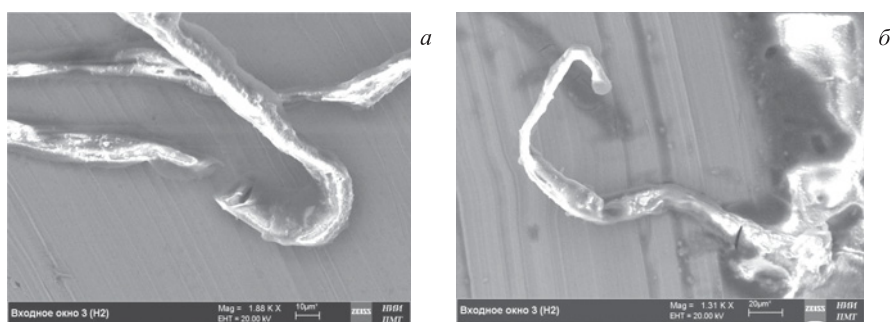


Рис. 12. РЭМ-изображения со сложными переплетениями двух объектов значительных размеров

На рис. 13 показан вид стенки заглибления в ВО с осажденными на ней структурами в виде наростов с размерами в несколько мкм.

На рис. 14 приведены: участок длинной нити с наростами при увеличении 4,20 КХ (*a*) и структура, приросшая к стенке, также с наростами (*б*). К нашему сожалению, сделать полноценный РМЗА структуры на рис. 14, *a* не удастся: структура расположена в углублении и сигнал не попадает в детектор. РМЗА структуры на рис. 14, *б* в т. 18 проведен, соответствующий СХРИ представлен на рис. 14, *в*. В табл. 4 показан элементный состав.

Как видно, в этой структуре содержится много углерода (63,56 ат. %), присутствуют азот (8,73 ат. %) и фтор (0,94 ат. %), которые могут находиться только в химически связанном состоянии, а также ряд других элементов, который включает железо ($0,16 \pm 0,03$ вес. %).

На рис. 15 представлены РЭМ-изображения с внутренней стенкой заглибления в ВО по мере роста увеличения: *a* — 1,99 КХ, *б* — 15,26 КХ и *в* —

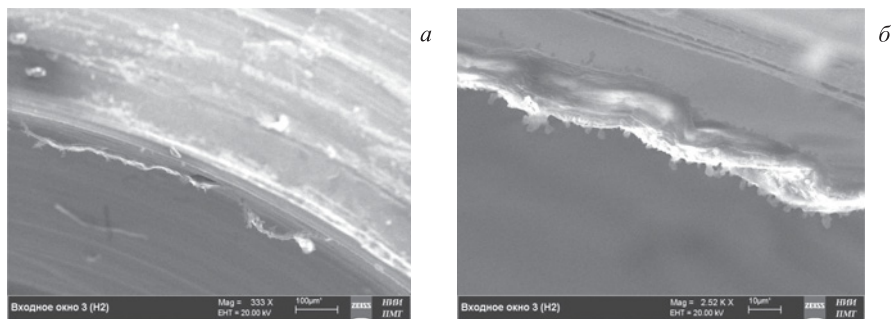


Рис. 13. РЭМ-изображения структуры на поверхности стенки заглибления в ВО с увеличением 333 X (а) и 2,52 КХ (б) с наростами размерами в несколько мкм

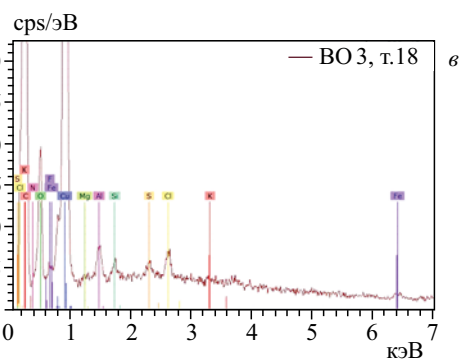
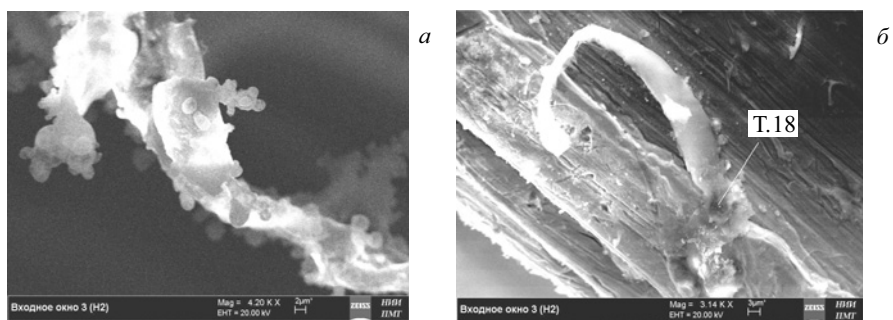


Рис. 14. РЭМ-изображения участка длинной нити с наростами (а) и структуры, присоединенной к стенке (б), в которой в т. 18 проведен РМЗА, а также соответствующий СХРИ (в)

16,13 КХ. Вся стенка покрыта мелкими частицами размерами в доли мкм, а светлая полоса вся «заросла» наростами, также малых размеров.

На рис. 16 представлено РЭМ-изображение мелкой частицы (а), которая внешне напоминает ограниченную структуру с размерами 3,5 мкм, в т. 19 этой частицы сделан РМЗА, а также СХРИ (б). В табл. 5 приведен элементный состав в т. 19 на рис. 16, а.

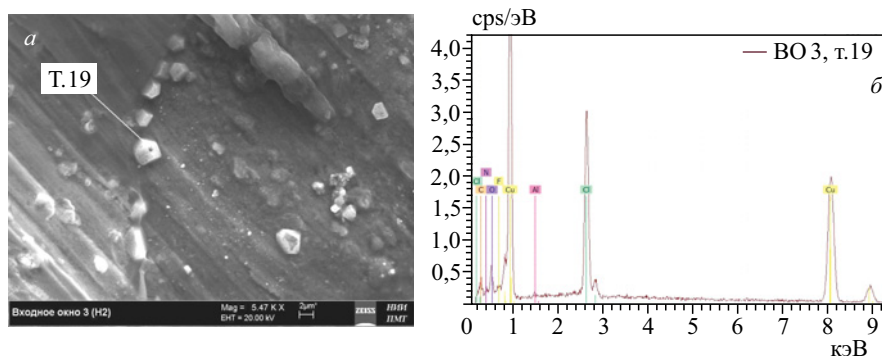


Рис. 16. РЭМ-изображение мелкой частицы (а), которая внешне напоминает ограниченную структуру с размерами 3,5 мкм, в т. 19 этой частицы проведен РМЗА, и соответствующий СХРИ (б)

Таблица 5. Элементный состав частицы на торце ВО, в т. 19 которой сделан РМЗА, соответствующий СХРИ на рис. 16, б

Элемент	Z	Серия	C, вес. %	C, ат. %
Углерод	6	К	13,48 ± 2,93	31,60
Азот	7	К	7,98 ± 1,96	16,05
Кислород	8	К	8,59 ± 1,67	15,12
Фтор	9	К	1,93 ± 0,51	2,86
Алюминий	13	К	0,23 ± 0,05	0,24
Хлор	17	К	11,59 ± 0,42	9,21
Медь	29	К	56,20 ± 1,54	24,91

Из таблицы видно: в этой структуре содержится немного углерода (31,60 ат. %), много азота (16,05 ат. %) и фтора (2,86 ат. %), которые могут находиться только в химически связанном состоянии, а также хлора (11,59 ± 0,42 вес. %). Наличие большого количества меди (56,20 ± 1,54 вес. %) свидетельствует о том, что пучок электронов захватывает значительную площадь от подложки из меди.

На рис. 17, а приведена серия структур малых размеров и один объект размером 32,9 мкм, в т. 20 которого проведен РМЗА, на рис. 17, б — соответствующий СХРИ. Элементный состав показан в табл. 6.

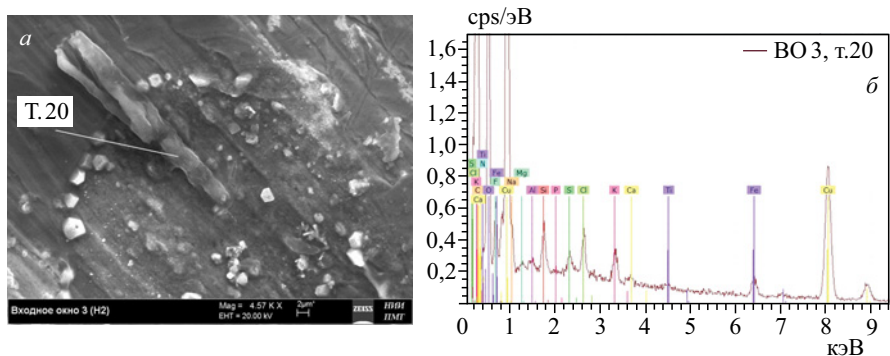


Рис. 17. РЭМ-изображение различных объектов (*a*), на самом крупном в т. 20 выполнен РМЗА, и соответствующий СХРИ (*б*)

На рис. 18, *a* представлено РЭМ-изображение другой структуры размером $14,3 \times 20$ мкм, в т. 21 которой сделан РМЗА, на рис. 18, *б* — соответствующий спектр. Результаты измерения представлены в табл. 6.

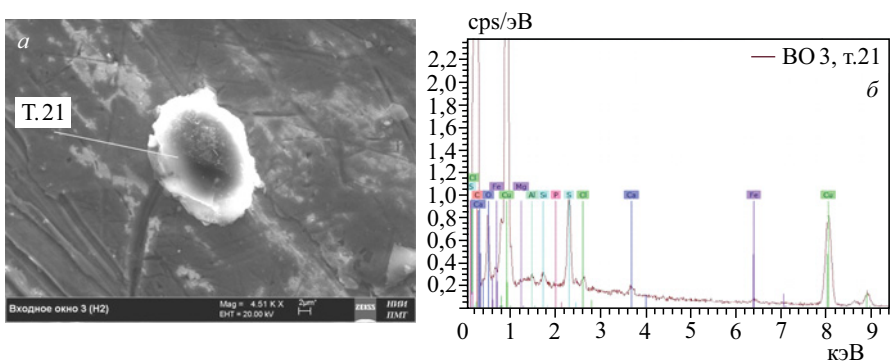


Рис. 18. РЭМ-изображение структуры размером $14,3 \times 20$ мкм (*a*), в т. 21 выполнен РМЗА, и соответствующий СХРИ (*б*)

Как видно из таблицы, в частицах присутствуют все элементы от углерода до цинка, за исключением азота, неона, аргона, скандия (редкий элемент), и элементы от титана до железа (ванадий, хром и марганец).

На рис. 19 представлено РЭМ-изображение рыхлой частицы (*a*) с максимальными размерами: длиной 30,8 мкм и шириной 15,0 мкм. В т. 22 этой частицы сделан РМЗА, а его результат — СХРИ — показан на рис. 19, *б*. В табл. 7 приведен элементный состав в т. 22 на рис. 19, *a*.

Частицы такого рыхлого внешнего вида и с похожим элементным составом встречались и в других экспериментах. Отметим, что данная частица со-

Таблица 6. Элементный состав частиц на торце ВО в т. 20 и 21, соответствующий СХРИ на рис. 17,б и 18,б

Элемент	Z	Серия	C, вес. %	C, ат. %	C, вес. %	C, ат. %
			Т. 20		Т. 21	
Углерод	6	К	40,58 ± 4,14	56,10	70,47 ± 7,91	84,50
Кислород	8	К	31,34 ± 3,23	32,53	12,25 ± 1,82	11,03
Фтор	9	К	4,35 ± 0,63	3,80	—	—
Натрий	11	К	1,51 ± 0,11	1,09	—	—
Магний	12	К	0,30 ± 0,04	0,21	0,23 ± 0,04	0,14
Алюминий	13	К	0,19 ± 0,04	0,11	0,20 ± 0,04	0,11
Кремний	14	К	0,42 ± 0,04	0,25	0,16 ± 0,03	0,08
Фосфор	15	К	0,03 ± 0,03	0,02	—	—
Сера	16	К	0,19 ± 0,03	0,10	1,37 ± 0,08	0,61
Хлор	17	К	0,51 ± 0,04	0,24	0,18 ± 0,03	0,07
Калий	19	К	0,59 ± 0,04	0,25	—	—
Кальций	20	К	0,20 ± 0,03	0,08	0,16 ± 0,03	0,06
Титан	22	К	0,09 ± 0,03	0,03	—	—
Железо	26	К	1,19 ± 0,06	0,35	0,24 ± 0,04	0,06
Медь	29	К	0,08 ± 0,06	0,08	14,04 ± 0,40	3,18
Цинк	30	К	—	—	0,69 ± 0,06	0,15

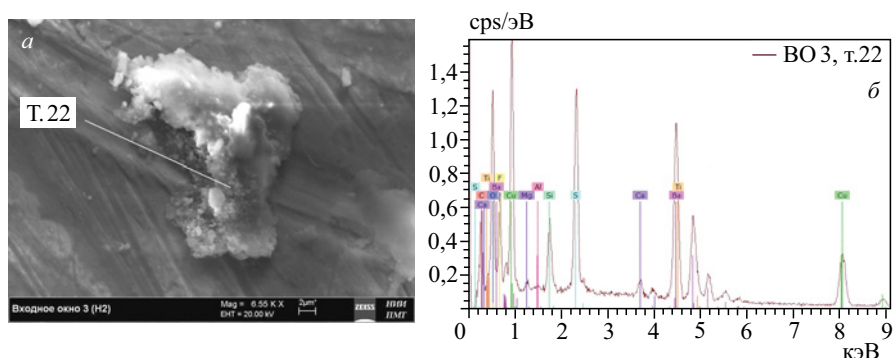


Рис. 19. РЭМ-изображение рыхлой частицы (а), в т. 22 которой выполнен РМЗА, и соответствующий СХРИ (б)

держит несколько меньшую концентрацию углерода (см., например, табл. 3, 4 и б), но очень большие концентрации связанного фтора (13,40 ат. %), кремния (1,74 ат. %), серы (4,72 ат. %), титана (1,59 ат. %) и особенно много бария ($23,87 \pm 0,64$ вес. %). Образование бария, элемента с номером $Z = 56$, при самом тяжелом элементе в ННРС — меди — требует протекания в процессе

Таблица 7. Элементный состав частицы в т. 22, соответствующий СХРИ на рис. 19, б

Элемент	Z	Серия	C, вес. %	C, ат. %
Углерод	6	К	16,66 ± 2,40	34,06
Кислород	8	К	21,45 ± 2,67	32,93
Фтор	9	К	10,37 ± 1,42	13,40
Магний	12	К	0,86 ± 0,08	0,86
Алюминий	13	К	0,38 ± 0,05	0,34
Кремний	14	К	2,11 ± 0,11	1,74
Сера	16	К	6,16 ± 0,23	4,72
Калий	19	К	0,59 ± 0,04	0,25
Кальций	20	К	0,68 ± 0,05	0,42
Титан	22	К	3,11 ± 0,11	1,59
Медь	29	К	14,37 ± 0,41	5,55
Барий	56	К	23,87 ± 0,64	4,27

облучения ядерных реакций с асимметричным делением ядер типа меди и последующего слияния осколков деления.

2.2. Измерение разрезанной пополам реакционной камеры из особо чистой меди (РК-М) из эксперимента ННРС при давлении 3,4 кбар (рис. 1, поз. 7). На рис. 20 представлены два РЭМ-изображения структур на поверхности разрезанной пополам втулки (а, б), а также спектр (в). В т. 1 сложной структуры, состоящей из множества более мелких, сделан РМЗА. В табл. 8 представлен элементный состав в т. 1.

Как видно из таблицы, структура содержит относительно немного углерода (34,25 ат. %) и кислорода (18,40 ат. %), а также химические элементы от магния (0,11 ат. %) до кальция (0,02 ат. %), включает металлы, такие как титан ($0,05 \pm 0,03$ вес. %), железо ($0,21 \pm 0,04$ вес. %) и никель ($0,29 \pm 0,04$ вес. %). Рыхлая структура размером $\approx 70 \times 76$ мкм состоит из переплетенных нитей и более мелких частиц. При электронном пучке с энергией 20 кэВ измеренная концентрация меди из подложки составляет $79,56 \pm 2,13$ вес. %.

На рис. 21 показаны РЭМ-изображения двух частиц на поверхности РК-М, одна из них напоминает углеродную трубку (а), а вторая структура плотная (б). В т. 2 и 3 этих частиц сделан РМЗА, спектры которого приведены на рис. 21, в и г. В табл. 9 представлен элементный состав в т. 2 и 3.

Из табл. 9 можно сделать выводы: тонкостенная трубка (т. 2) содержит много углерода (39,70 ат. %) и азота (14,38 ат. %), а также кислород (28,23 ат. %). В плотной структуре (т. 3) обнаружено много натрия ($1,12 \pm 0,11$ вес. %), алюминия ($2,92 \pm 0,17$ вес. %), кремния ($5,18 \pm 0,26$ вес. %), серы ($0,52 \pm 0,05$ вес. %), хлора ($2,18 \pm 0,11$ вес. %), калия ($2,14 \pm 0,10$ вес. %), кальция ($2,49 \pm 0,11$ вес. %) и железа ($2,99 \pm 0,12$ вес. %).

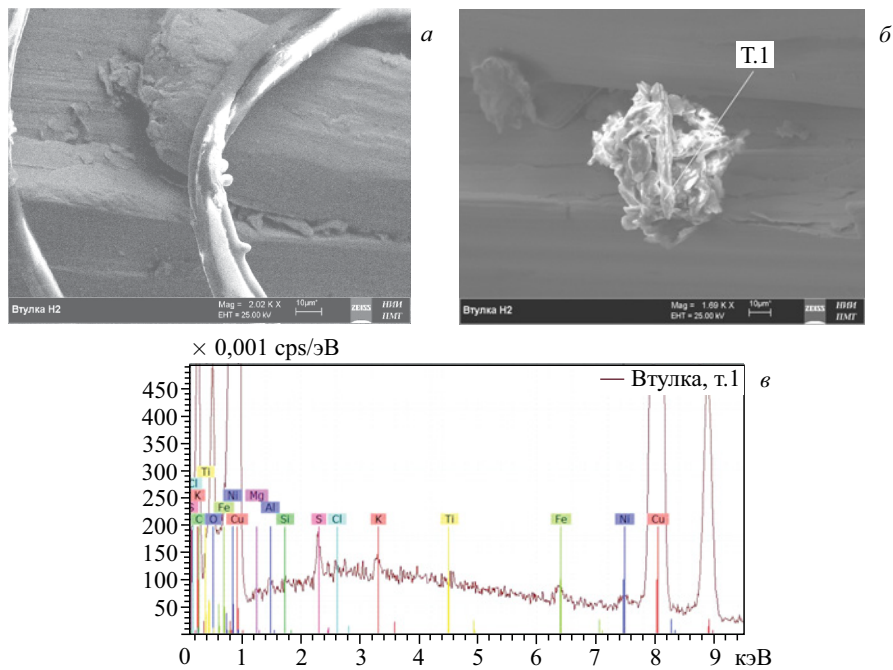


Рис. 20. РЭМ-изображения структур на поверхности разрезанной пополам втулки (а, б), в т. 1 сложной структуры сделан РМЗА, и соответствующий спектр (в)

Таблица 8. Элементный состав в т. 1 на рис. 20, б

Элемент	Z	Серия	C, вес. %	C, ат. %
Углерод	6	K	11,17 ± 2,34	34,25
Кислород	8	K	7,99 ± 1,43	18,40
Магний	12	K	0,07 ± 0,04	0,11
Алюминий	13	K	0,06 ± 0,04	0,08
Кремний	14	K	0,04 ± 0,03	0,05
Сера	16	K	0,37 ± 0,05	0,43
Калий	19	K	0,18 ± 0,04	0,17
Кальций	20	K	0,02 ± 0,03	0,02
Титан	22	K	0,05 ± 0,03	0,04
Железо	26	K	0,21 ± 0,04	0,14
Никель	28	K	0,29 ± 0,04	0,18
Медь	29	K	79,56 ± 2,13	46,13

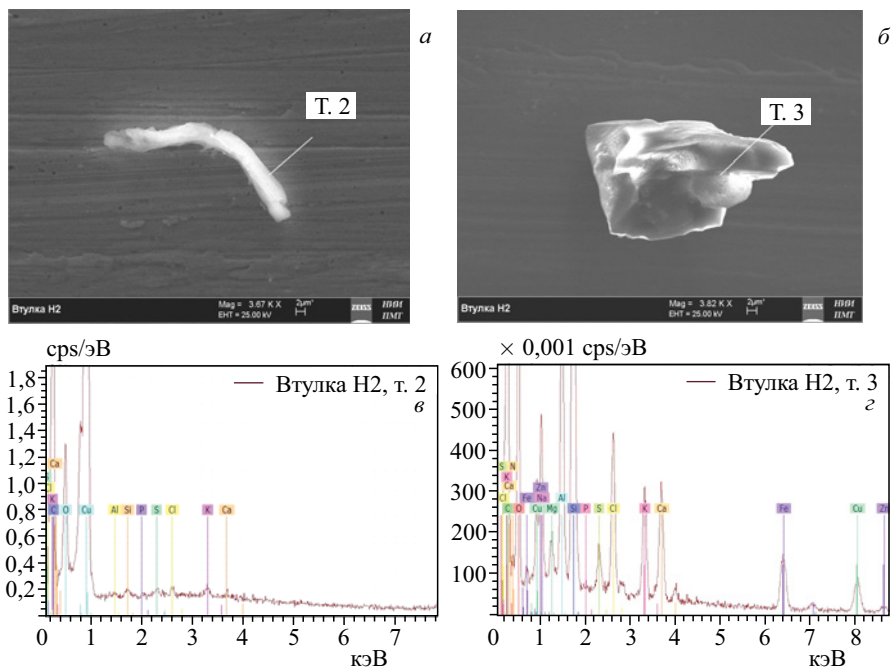


Рис. 21. РЭМ-изображения двух частиц на поверхности РК-М (а, б), в т. 2 и 3 которых сделан РМЗА, и соответствующие спектры (в и з)

На рис.22 представлены два РЭМ-изображения поверхности РК-М с длинными тонкими нитями (некоторые нити длиной более 1 мм), похожими на нити в ВО (см. п. 2.1). Определить их элементное содержание невозможно: эти нити разваливаются (прожигаются) при наборе спектра.

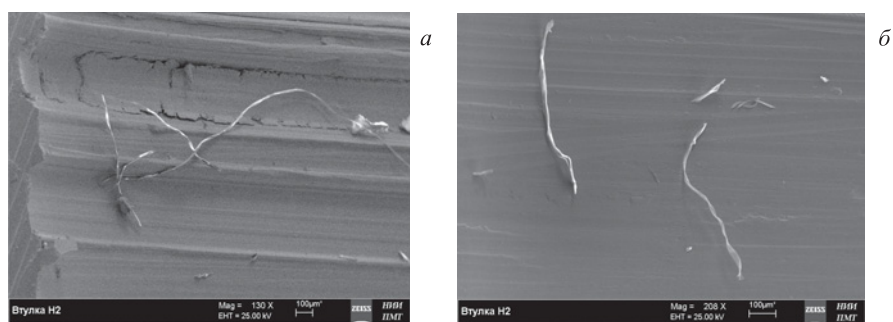


Рис. 22. РЭМ-изображения поверхности РК-М с длинными тонкими нитями

Таблица 9. Элементный состав частиц в т. 2 и 3 на рис. 21, а, б

Элемент	Z	Серия	C, вес. %	C, ат. %	C, вес. %	C, ат. %
			Т. 2		Т. 3	
Углерод	6	К	21,23 ± 3,84	39,70	33,49 ± 5,03	45,41
Азот	7	К	8,97 ± 1,89	14,38	6,34 ± 1,61	7,37
Кислород	8	К	20,12 ± 3,04	28,23	35,48 ± 5,03	36,12
Натрий	11	К	—	—	1,12 ± 0,11	0,79
Магний	12	К	—	—	0,40 ± 0,05	0,27
Алюминий	13	К	0,04 ± 0,03	0,03	2,92 ± 0,17	1,76
Кремний	14	К	0,04 ± 0,03	0,03	5,18 ± 0,26	3,00
Фосфор	15	К	0,02 ± 0,03	0,02	0,06 ± 0,03	0,03
Сера	16	К	0,01 ± 0,03	0,01	0,52 ± 0,05	0,27
Хлор	17	К	0,07 ± 0,03	0,04	2,18 ± 0,11	1,00
Калий	19	К	0,18 ± 0,04	0,10	2,14 ± 0,10	0,89
Кальций	20	К	0,10 ± 0,03	0,05	2,49 ± 0,11	1,01
Марганец	25	К	0,02 ± 0,03	0,01	—	—
Железо	26	К	0,07 ± 0,03	0,03	2,99 ± 0,12	0,87
Никель	28	К	0,10 ± 0,03	0,04	0,07 ± 0,04	0,02
Медь	29	К	49,03 ± 1,29	17,33	3,88 ± 0,16	1,00
Цинк	30	К	—	—	0,73 ± 0,07	0,18

2.3. Измерение сборника продуктов реакций из особо чистой меди (СБ-М) методами СЭМ и РМЗА из эксперимента с ННРС при давлении 3,4 кбар (рис. 1, поз. 8). Сборник продуктов ядерных и химических реакций (СБ-М) был исследован методами СЭМ и РМЗА сбоку, т. е. со стороны резьбы. На рис. 23 приведены РЭМ-изображения разнообразных структур (в том числе в виде ниток) между выступами резьбы с увеличением 546 X (а) при ширине полосы 180 мкм и с увеличением 619 X (б) при ширине полосы 360 мкм, а также увеличенное изображение мелких компонентов структур (1,6 КХ).

На рис. 24 представлены РЭМ-изображения резьбы СБ-М (а) и более мелких структур на ней (б). В т. 4 структуры размером 21 × 30 мкм с отростками и в т. 5 структуры сложной формы проведен РМЗА, получены соответствующие спектры (рис. 24, в и г). В табл. 10 приведен элементный состав в т. 4 и 5 на резьбе СБ-М.

Из спектра на рис. 24, в и табл. 10 можно заключить, что комплекс частиц в т. 4 состоит из углерода (43,20 ат. %), кислорода (53,71 ат. %), химически связанного фтора (1,04 ± 0,31 вес. %), натрия (0,90 ± 0,09 вес. %) и элементов от магния (0,37 ± 0,05 вес. %) до кальция (0,18 ± 0,03 вес. %), включает титан (0,18 ± 0,03 вес. %) и железо (0,25 ± 0,04 вес. %).

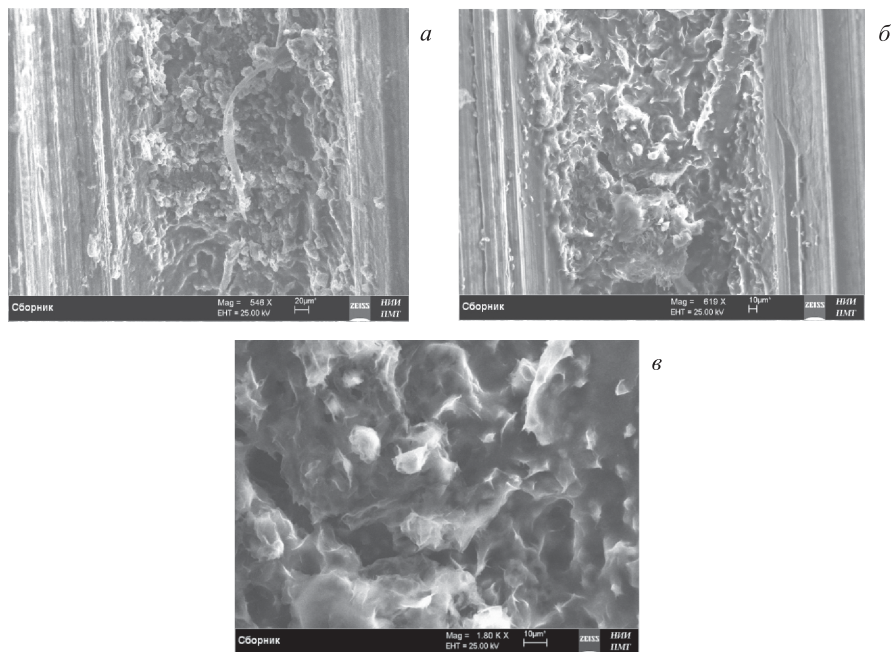


Рис. 23. РЭМ-изображения разнообразных структур (в том числе в виде ниток) между выступами резьбы на СБ-М (а и б) и увеличенное изображение мелких компонентов структур (в)

Крупная частица на рис. 24, б содержит много титана ($49,24 \pm 1,35$ вес. %), углерод (37,77 ат. %) и кислород (32,80 ат. %), а также алюминий ($2,60 \pm 0,16$ вес. %).

На рис. 25 приведены РЭМ-изображения комплексов ограниченных структур (по-видимому, кристаллитов) с размерами в несколько мкм и более крупной структуры 30 мкм шириной и 50 мкм длиной (д) на поверхности СБ-М, в т. 6, 7 и 8 которых проведен РМЗА. Соответствующие спектры показаны на рис. 25, в, г и е. В табл. 11 представлен элементный состав поверхности СБ-М в т. 6, 7 и 8 на рис. 25, а, б и д.

Из таблицы видно, что частица на рис. 25, а (т. 6) преимущественно состоит из углерода (82,57 ат. %), относительно меньшего количества кислорода (16,50 ат. %); возможно, углерод присутствует в соединении с водородом, т.е. в виде углеводородов. В частице обнаружены также металлы: титан ($0,14 \pm 0,03$ вес. %), марганец ($0,25 \pm 0,04$ вес. %) и никель ($0,12 \pm 0,03$ вес. %).

А поверхность СБ-М между частицами на рис. 25, б (т. 7) содержит углерод (52,37 ат. %), кислород (37,35 ат. %). В частице также присутствуют

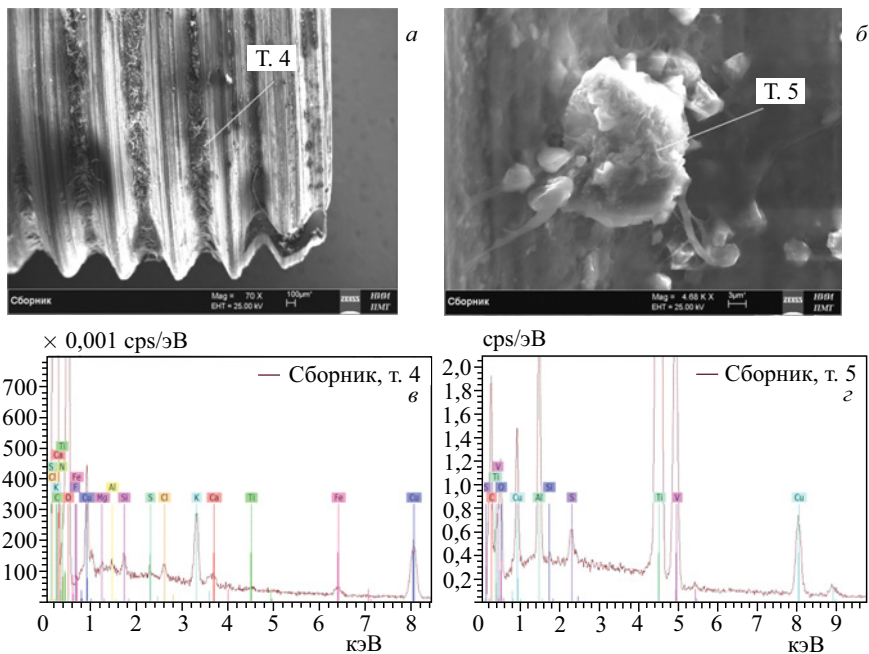


Рис. 24. РЭМ-изображения резьбы СБ-М (а) и более мелких структур на ней (б), в т. 4 и 5 сделан РМЗА, и соответствующие спектры (в и г)

Таблица 10. Элементный состав в т. 4 и 5 на рис. 24, а, б

Элемент	Z	Серия	Т. 4		Т. 5	
			C, вес. %	C, ат. %	C, вес. %	C, ат. %
Углерод	6	K	34,91 ± 4,41	43,20	19,12 ± 3,00	37,77
Кислород	8	K	57,81 ± 6,89	53,71	22,11 ± 3,71	32,80
Фтор	9	K	1,04 ± 0,31	0,82	—	—
Натрий	11	K	0,90 ± 0,09	0,58	—	—
Магний	12	K	0,37 ± 0,05	0,23	—	—
Алюминий	13	K	0,20 ± 0,04	0,11	2,60 ± 0,16	2,29
Кремний	14	K	0,15 ± 0,03	0,08	0,01 ± 0,03	0,01
Фосфор	15	K	—	—	—	—
Сера	16	K	0,05 ± 0,03	0,02	0,36 ± 0,04	0,27
Хлор	17	K	0,12 ± 0,03	0,05	—	—
Калий	19	K	0,81 ± 0,05	0,31	—	—
Кальций	20	K	0,18 ± 0,03	0,07	—	—
Титан	25	K	0,18 ± 0,03	0,02	49,24 ± 1,35	24,41
Железо	26	K	0,25 ± 0,04	0,07	—	—
Медь	29	K	3,11 ± 0,11	0,73	6,56 ± 0,21	2,45

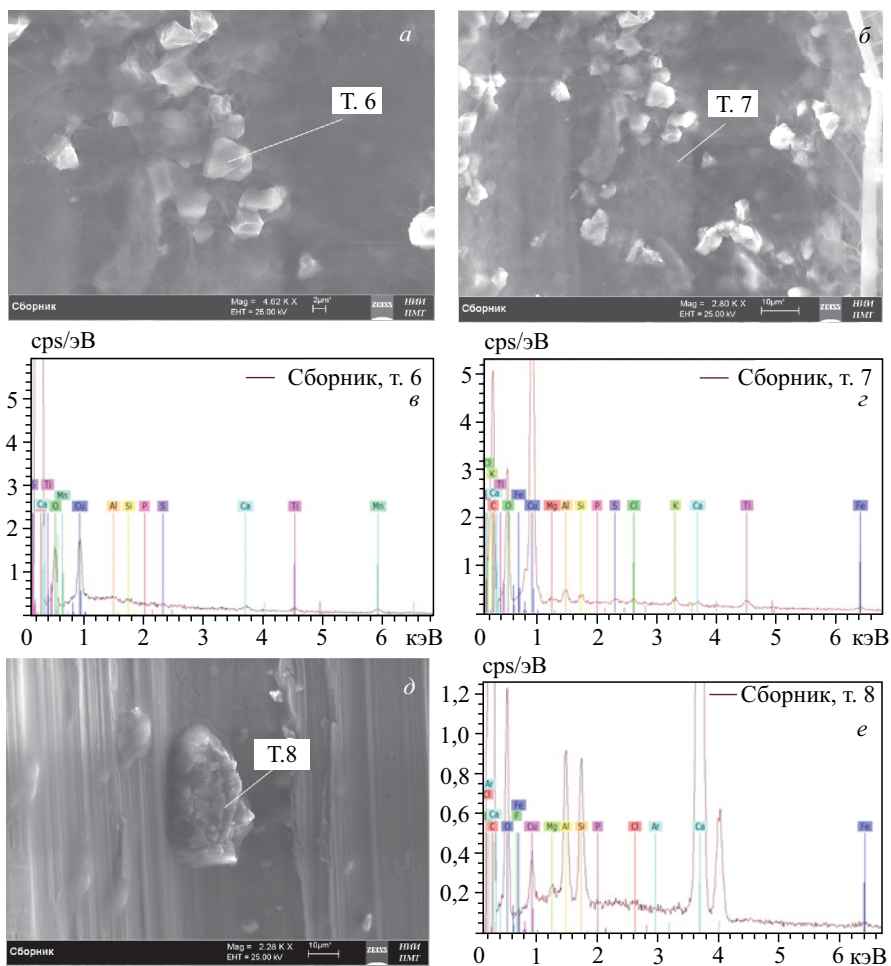


Рис. 25. РЭМ-изображения комплексов ограниченных структур и более крупной структуры на поверхности СБ-М (а, б, д), в т. 6, 7 и 8 которых сделан РМЗА, и соответствующие спектры (в, г и е)

металлы: титан ($0,46 \pm 0,04$ вес. %), железо ($0,20 \pm 0,04$ вес. %) и никель ($0,08 \pm 0,03$ вес. %).

Частица на рис. 25, д (т. 8) содержит много кальция ($17,81 \pm 0,56$ вес. %), азот (3,72 ат. %) и фтор ($1,10 \pm 0,39$ вес. %) в химически связанном состоянии, углерод (49,56 ат. %), кислород (35,52 ат. %), алюминий ($1,96 \pm 0,13$ вес. %), кремний ($1,19 \pm 0,08$ вес. %), а также железо ($0,19 \pm 0,04$ вес. %).

Таблица 11. Элементный состав в г. 6, 7 и 8 на рис.25, а, б и д

Элемент	Z	Серия	Т. 6		Т. 7		Т. 8	
			C, вес. %	C, ат. %	C, вес. %	C, ат. %	C, вес. %	C, ат. %
Углерод	6	К	75,86 ± 8,85	82,57	34,63 ± 4,95	52,37	36,45 ± 5,09	49,56
Азот	7	К	—	—	—	—	3,19 ± 1,10	3,72
Кислород	8	К	20,19 ± 3,08	16,50	32,90 ± 4,49	37,35	34,80 ± 5,18	35,52
Фтор	9	К	—	—	—	—	1,10 ± 0,39	0,95
Натрий	11	К	0,11 ± 0,04	0,06	—	—	—	—
Магний	12	К	—	—	0,79 ± 0,08	0,59	0,47 ± 0,06	0,31
Алюминий	13	К	0,06 ± 0,03	0,03	0,89 ± 0,08	0,60	1,96 ± 0,13	1,19
Кремний	14	К	0,05 ± 0,03	0,03	0,27 ± 0,04	0,17	1,19 ± 0,08	0,69
Фосфор	15	К	0,02 ± 0,03	0,01	0,03 ± 0,03	0,02	—	—
Сера	16	К	0,03 ± 0,03	0,01	0,13 ± 0,03	0,08	—	—
Хлор	17	К	—	—	0,14 ± 0,03	0,07	0,05 ± 0,03	0,02
Калий	19	К	0,03 ± 0,03	0,01	0,23 ± 0,04	0,11	0,06 ± 0,03	0,02
Кальций	20	К	0,12 ± 0,03	0,04	0,16 ± 0,03	0,07	17,81 ± 0,56	7,26
Титан	22	К	0,14 ± 0,03	0,04	0,46 ± 0,04	0,17	—	—
Марганец	25	К	0,25 ± 0,04	0,06	—	—	—	—
Железо	26	К	—	—	0,20 ± 0,04	0,06	0,19 ± 0,04	0,06
Никель	28	К	0,12 ± 0,03	0,03	0,08 ± 0,03	0,02	—	—
Медь	29	К	3,02 ± 0,12	0,62	29,09 ± 0,79	8,32	2,75 ± 0,12	0,71

Можно сделать важный и однозначный вывод (см. также [2–7]): наибольшее число структур, получившихся в результате осаждения из газовой фазы, происходит на неоднородностях поверхности, а наиболее сильные неоднородности — это резьбовые соединения.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Как и в эксперименте с водородом при давлении 1,1 кбар в ННРС [4, 5], в данной работе была синтезирована крупная частица (см. рис. 2) длиной около 2 мм и шириной примерно 0,7 мм, которая, скорее всего, состоит из углерода и водорода с малыми концентрациями легких элементов от углерода до кальция.

Исследования резьбы на ВО в ННРС позволили установить, что она в отдельных местах (см. рис. 3–7) заполнена большим количеством мелких частиц, состав которых представлен в табл. 1 и 2. Как видно, например, из табл. 1, после исключения углерода, который присутствует в значительном количестве (обозначим такую относительную концентрацию элемента символом «*»), для повышения чувствительности по другим элементам, мелкие частицы содержат: много кислорода (50,78* ат. %), фтора (4,45* ат. %), алюминия (2,90* ат. %), кремния (3,36* ат. %), серы (50,78* ат. %), хлора (50,78* ат. %), калия (0,44* ат. %), кальция (0,46* ат. %). Присутствует ряд металлов: титан, ванадий, хром, железо, никель и цинк.

Углубление в ВО изнутри покрылось налетом частиц и длинными нитями, скорее всего, состоящими из углерода и водорода. Результаты РЭМ- и РМЗА-исследований частиц на внутренней поверхности углубления в ВО и на его торцевой части (см. рис. 8–19) показали (см. табл. 3–7), что в их состав входят углерод, кислород, химически связанные азот и фтор.

В работах [1, 5, 8] представлены ядерные реакции слияния («восходящие») и деления («нисходящие»), которые могут привести к образованию тех химических элементов, которых не было до начала эксперимента. В [1] также обсуждаются возможности и важность учета атомных процессов (фотоэффекта, комптоновского рассеяния и процесса рождения электрон-позитронных пар) при рассеянии γ -квантов на атомах среды.

Обнаружение тяжелого элемента — бария — можно также объяснить первичными реакциями асимметричного деления, например меди, и последующим подбарьерным слиянием осколков деления.

Сравнивая результаты по эффектам, произведенным облучением γ -квантами с энергией 10 МэВ в камерах, заполненных водородом при давлении 3,4 и 1,1 кбар [5, 6], можно сделать вывод, что эффекты и разнообразие созданных структур при меньшем давлении водорода более значительные.

В табл. 7 представлены результаты по изучению элементного состава рыхлой частицы на рис. 18, а. Как видно, в этой частице присутствует в значительных количествах барий ($23,87 \pm 0,64$ вес. %). Попытаемся понять, из каких ядерных реакций он мог образоваться.

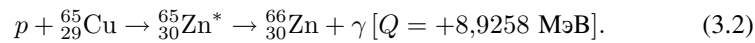
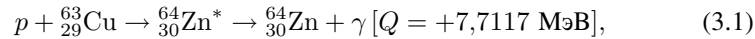
Как известно, при упругом рассеянии γ -кванта на атомах максимальная переданная им энергия T_M^{\max} оценивается из соотношения [9, 1]

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

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

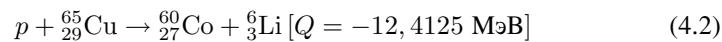
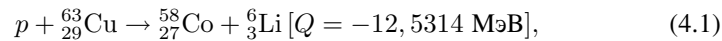
$$\begin{aligned} T_H^{\max}(10 \text{ МэВ}) &= 208,6 \text{ кэВ}; \\ T_{H_2}^{\max}(10 \text{ МэВ}) &= 105,4 \text{ кэВ}. \end{aligned} \quad (2)$$

Из табл. 1, 2 и 6 видно, что в отдельных обнаруженных структурах присутствует цинк. Его образование можно объяснить подбарьерным слиянием протонов с энергиями $E \leq T_H^{\max}$ с изотопами меди (основного материала стенки РК-М и ВО, рис. 1 поз. 7 и поз. 4 соответственно) по реакциям [11]



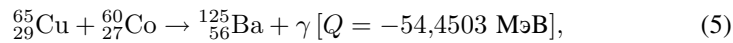
В работах [12–14] показано, что в капельной модели ядра при увеличении углового момента барьер деления понижается и могут происходить процессы асимметричного деления ядер вплоть до ядер изотопов серебра, для которых эта модель работает.

Реакции с асимметричным делением или делением из возбужденных состояний составных ядер ${}^{64}_{30}\text{Zn}^*$ или ${}^{66}_{30}\text{Zn}^*$ с образованием ядер ${}^{58}_{27}\text{Co}$ или ${}^{60}_{27}\text{Co}$ (см. дефекты масс в [10])



требуют энергий протонов, превышающих $E_{\text{кин}} > |Q|$.

В реакции слияния вида



во-первых, значительная энергия $E_{\text{кин}} > |Q| = 54,45$ МэВ, а во-вторых, не хватает пяти нейтронов даже для образования легчайшего стабильного изотопа ${}^{130}_{56}\text{Ba}$ (0,106 %).

В работах [15, 16] предложены так называемые реакции с участием третьей ассоциированной частицы, или процессы твердотельной ядерной конверсии (third charge associated particle), при которых энергия возбуждения составного ядра передается третьей частице, а не снимается испусканием γ -кванта. Рассмотрим, например, процесс подбарьерного слияния протона и ядра ${}_{29}^{65}\text{Cu}$:

$$p + {}_{29}^{65}\text{Cu} + ({}_{29}^{65}\text{Cu}) \rightarrow {}_{30}^{66}\text{Zn}^* + ({}_{29}^{65}\text{Cu}), \quad (6.1)$$

$$p + {}_{29}^{65}\text{Cu} + (p) \rightarrow {}_{30}^{66}\text{Zn}^* + (p). \quad (6.2)$$

При этом энергии ассоциированных частиц ${}_{29}^{65}\text{Cu}$ и p имеют значения

$$E_{{}_{29}^{65}\text{Cu}}({}_{29}^{65}\text{Cu}) = |Q_{(3.2)}| M_{{}_{30}^{66}\text{Zn}} / (M_{{}_{30}^{66}\text{Zn}} + M_{{}_{29}^{65}\text{Cu}}) = 4,5 \text{ МэВ}, \quad (7.1)$$

$$E_p = |Q_{(3.2)}| M_{{}_{30}^{66}\text{Zn}} / (M_{{}_{30}^{66}\text{Zn}} + p) = 8,79 \text{ МэВ}, \quad (7.2)$$

где $|Q_{(3.2)}| = 8,9258 \text{ МэВ}$ — энергия реакции из выражения (3.2). Такие реакции будут происходить в материале стенок РК-М и ВО (см. подробнее в [15, 16]).

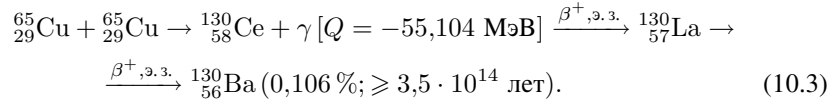
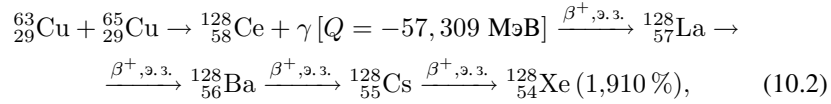
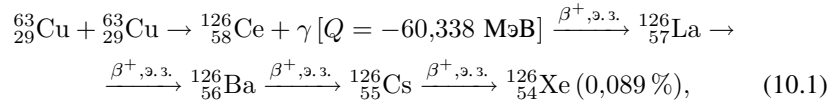
Как видно из оценок в (7.1), (7.2), энергии ассоциированных ядер меди и протонов уже достаточно большие, поэтому возрастает и сечение подбарьерного слияния по формуле Гамова

$$\sigma(E) = \frac{S(E)}{E} \exp \left\{ -\sqrt{\frac{E_G}{E}} \right\}, \quad (8)$$

где $S(E)$ — астрофизический фактор, слабо зависящий от энергии. Энергия Гамова имеет вид

$$E_G = \frac{M}{2} \{2\pi e_0^2 Z_1 Z_2 / \hbar\}^2. \quad (9)$$

Поскольку при реакциях деления (4.1), (4.2) и слияния (5) не удается описать образование бария, рассмотрим реакции слияния ядер меди с «горячими» ядрами меди (см. выражения (7.1), (7.2)) (дефекты масс взяты из [10]):



Как видно из (10.1)–(10.3), в двух первых реакциях образуется летучий инертный газ — ксенон. Только в реакции (10.3) возникает барий, который можно детектировать. Без учета других возможных реакций можно сделать вывод, что по предложенному механизму может образовываться только один легчайший изотоп бария — $^{130}_{56}\text{Ba}$ (0,106%; $\geq 3,5 \cdot 10^{14}$ лет). Следовательно, для проверки применимости предлагаемого механизма масс-изотопный анализ бария позволит ответить на этот вопрос.

Другой вероятной возможностью получения бария, как видно из *рыхлой структуры* на рис. 18, *a*, образовавшейся *осаждением из газовой фазы*, может служить подход, представленный в обзоре [17], из которого можно сделать вывод, что стабильные или нестабильные ядра, которые строятся на основе ядер гелия, с высокой эффективностью поглощают нейтроны, а возможно, и протоны.

В заключение авторы выражают признательность за полезные обсуждения ведущему научному сотруднику ЛЯР им. Г. Н. Флерова ОИЯИ В. А. Щеголеву, за подготовку ННРС к облучению и постоянную помощь ведущему научному сотруднику НЦЯИ доктору Т. Вильчиньска-Китовской, за облучение ННРС γ -квантами А. Г. Белову, за помощь в исследовании методами СЭМ 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Structure and Chemical Composition Changes of Pd Rod and Reaction Product Collector Irradiated by 100 MeV Braking Gamma Quanta inside High Pressure Chamber Filled with 2.5 kbar Molecular Hydrogen // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2014. V. 11, No. 4. P. 513–527; Препринт ОИЯИ Р15-2013-80. Дубна, 2013.
2. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* Синтез новых структур на поверхности Pd-стержня и элементов ННРС и их химический состав при ядерных реакциях под действием тормозных γ -квантов с пороговой энергией 10 МэВ в молекулярном водороде при давлении 0,5 кбар. Препринт ОИЯИ Р15-2014-6. Дубна, 2014.
3. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* Химический состав и структура синтезированных частиц на поверхности ННРС при ядерных реакциях при облучении тормозными γ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ в молекулярном водороде при давлении 0,5 кбар. Препринт ОИЯИ Р15-2014-7. Дубна, 2014.
4. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Synthesis of Microobjects in 1.1 kbar Hydrogen Induced by 10 MeV Bremsstrahlung γ Quanta on Inner Surfaces of Components of a High Pressure Chamber (Part 1) // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2015. V. 12, No. 1. P. 125–144.

5. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Synthesis of Microparticles in 1.1 kbar Hydrogen Induced by 10 MeV Bremsstrahlung γ Quanta in a Reaction Chamber (Part 2) // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2015. V. 12, No. 1. P. 145–165.
6. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* Свойства структур на основе углерода, синтезированных в ядерных реакциях в гелии при давлении 1,1 кбар под действием облучения тормозными γ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ. Препринт ОИЯИ P15-2014-38. Дубна, 2014.
7. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* Ядерные реакции, синтез химических элементов и новых структур в плотном гелии при давлении 1,1 кбар под действием облучения тормозными γ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ. Препринт ОИЯИ P15-2014-50. Дубна, 2014.
8. *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(180). P. 437–457; JINR Preprint E15-2012-35. Dubna, 2012.
9. *Углов В. В.* Радиационные эффекты в твердых телах. Минск: БГУ, 2011. 207 с.
10. *Голашвили Т. В., Чечев В. П., Бадиков С. А.* Справочник нуклидов. М.: Изд. дом МЭИ, 2011. 461 с.
11. *Физические величины: Справочник / Под ред. Григорьева И. С., Мейлихова Е. З.* М.: Энергоатомиздат, 1991. 1234 с.
12. *Moretto Luciano G.* Statistical Emission of Large Fragments: A General Theoretical Approach // *Nucl. Phys. A.* 1975. V. 247. P. 211–230.
13. *Sierk A. J.* Mass-Asymmetric Fission of Light Nuclei // *Phys. Rev.* 1985. V. 55, No. 6. P. 582–583.
14. *Sierk A. J.* Macroscopic Model of Rotating Nuclei // *Phys. Rev. C.* 1986. V. 33, No. 6. P. 2039–2052.
15. *Kálmán P., Keszthelyi T.* Solid State Internal Conversion // *Phys. Rev. C.* 2004. V. 69. 031606(R). P. 1–3.
16. *Kálmán P., Keszthelyi T.* Lattice Effect in Solid State Internal Conversion // *Phys. Rev. C.* 2009. V. 79. 031602(R). P. 1–4.
17. *Freer M.* The Clustered Nucleus–Cluster Structures in Stable and Unstable Nuclei // *Rep. Prog. Phys.* 2007. V. 70. P. 2149–2210.

Получено 26 августа 2015 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 14.03.2016.

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

Усл. печ. л. 1,87. Уч.-изд. л. 2,32. Тираж 225 экз. Заказ № 58769.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/