

P15-2014-89

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

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ С СИНТЕЗОМ МИКРОЧАСТИЦ
В ВОДОРОДЕ ПРИ ДАВЛЕНИИ 3,5 кбар
В ПРИСУТСТВИИ ОЛОВА
ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ТОРМОЗНЫМИ γ -КВАНТАМИ
С ПОРОГОВОЙ ЭНЕРГИЕЙ 10 МэВ

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

¹ Национальный центр ядерных исследований, Отвоцк, Польша

* didyk@jinr.ru

** roland.wisniewski@gmail.com

Дидык А. Ю., Вишнеvский Р.

P15-2014-89

Ядерные реакции с синтезом микрочастиц в водороде при давлении 3,5 кбар в присутствии олова при облучении тормозными γ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ

Образец в виде цилиндра из чистого (99,98 %) олова, помещенный в камеру высокого давления водорода (ННРС) при давлении 3,5 кбар, был облучен тормозными γ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ. При вскрытии ННРС из нее были извлечены в значительном количестве синтезированные микрочастицы, которые отделились от стенок реакционной камеры. Были проведены исследования элементного состава и структуры части обнаруженных микрочастиц и всех внутренних поверхностей компонент ННРС, включая и стержень из олова. Установлено, что микрочастицы можно условно подразделить на три части: линейчатые, рыхлые и плотные. В результате ядерных реакций при облучении ННРС тормозными γ -квантами произошли ядерные реакции с образованием легких элементов от углерода до металлов средних масс, а также и 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, 2014

Didyk A. Yu., Wiśniewski R.

P15-2014-89

Nuclear Reactions with Synthesis of Microparticles in Hydrogen at a Pressure of 3.5 kbar in the Presence of Tin under Irradiation by Braking γ -Quanta with a Threshold Energy of 10 MeV

A rod of pure (99.98%) tin that was placed in a hydrogen high-pressure chamber (HHPC) at a pressure of 3.5 kbar was irradiated with braking γ -rays of 10 MeV threshold energy. Upon opening the HHPC, a large number of synthesized microparticles were detached from the reaction chamber walls and spilled out. Detailed studies of the element composition and structure of microparticles and all the internal surfaces of the HHPC components, including the tin rod, have been carried out. It is found that the microparticles can be divided into three parts: banded, loose and compact. As a result of nuclear reactions under the irradiation by braking γ -rays, nuclear reactions took place with the formation of light elements from carbon to medium-mass metals, as well as heavier ones, such as barium. Possible upward (with synthesis of elements from lighter ones) and downstream (with fission of heavier nuclei into lighter elements) nuclear reactions are discussed.

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

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

ВВЕДЕНИЕ

В цикле выполненных ранее исследований были изучены изменения элементных составов, структуры всех внутренних поверхностей и множественные синтезированные структуры (макро- и микрочастицы) из отсутствовавших ранее химических элементов в насыщенном дейтерием палладии в плотном газообразном молекулярном дейтерии [1–13], в металлах (Al, V, Cu, Re) и сплавах ($Y\text{Mn}_2$, нержавеющая сталь) в плотном газообразном дейтерии [14–18], в палладии, насыщенном водородом [19–21], в плотном газообразном молекулярном водороде [22, 23], в плотном газообразном гелии [24, 25]. Модельный подход для описания всех возможных ядерных реакций и атомных процессов при облучении высокоэнергетическими γ -квантами с энергиями в диапазоне 10–25 МэВ атомов среды в облучаемых камерах ДНРС, ННРС и HeНРС (deuterium, hydrogen and helium high pressure chambers) предложен концептивно в работах [20, 23, 25, 26].

В работе [27] представлены результаты детальных исследований внутренних поверхностей ННРС с цилиндром из олова с описанием элементного состава обнаруженных микроструктур (первая часть результатов эксперимента).

В работах, рассмотренных в [20–23], также были синтезированы крупные микрочастицы, в а работах [24, 25] — значительное количество углеродных фольг и других микрообъектов. Цель данной работы — исследовать элементный состав микрочастиц, которые образовались внутри ННРС, заполненной плотным молекулярным водородом при давлении 3,5 кбар, с цилиндром из олова при воздействии γ -квантов с энергией 10 МэВ (вторая часть результатов эксперимента [27]).

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ И ПАРАМЕТРЫ ОБЛУЧЕНИЯ γ -КВАНТАМИ

Схема экспериментальной камеры ННРС с образцом олова, использованная в данном эксперименте, представлена на рис. 1.

Как видно из рис. 1, внутри камеры был расположен достаточно массивный образец в виде цилиндра из олова (поз. 2) с чистотой 99,9 % с исходной массой 8,5731 г при длине 17 мм и диаметре 9,5 мм. С двух сто-

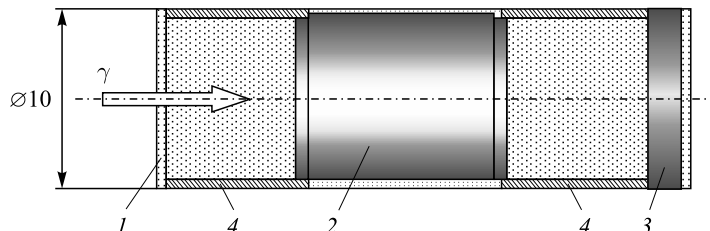


Рис. 1. Схема реакционной камеры, заполненной водородом с образцом Sn

рон этот цилиндр закреплялся двумя втулками (поз. 4) из бериллиевой бронзы (ББ). Внутренняя камера, в которой находился цилиндрический образец олова, была того же состава, что и сборник продуктов реакций (поз. 3), а именно, также из ББ. Входное окно (поз. 1), как и ранее, было изготовлено из ББ. Исходное давление водорода внутри реакционной камеры составляло 3,5 кбар. При таком давлении массовая плотность водорода приблизительно равна $0,0868 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, а атомная плотность водорода — $5,186 \cdot 10^{22} \text{ ат. н} \cdot \text{см}^{-3}$ [10].

Энергия электронов при облучении на ускорителе МТ-25 Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова составляла $E_e \cong 10 \text{ МэВ}$, а ток пучка варьировался в пределах 22–24 мкА. Для получения тормозных γ -квантов использовалась вольфрамовая мишень с толщиной 2,5 мм, за которой располагался поглотитель электронов из алюминия с толщиной 25 мм. Температура защитной оболочки камеры ННРС в стационарном режиме при облучении составляла 60–64 °С. Облучение γ -квантами было проведено в течение 69 ч 47 мин (т. е. $2,5 \cdot 10^5 \text{ с}$).

При вскрытии камеры измеренное значение давления водорода оказалось равным $\sim 3,0 \text{ кбар}$, а из реакционной камеры выпало значительное количество частиц черного цвета (примерно 30–40 шт.). Затем все внутренние поверхности компонент ННРС (поз. 1–4), имевшие контакт с водородом, и значительная часть этих синтезированных частиц были исследованы методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) и рентгеновского микрозондового анализа (РМЗА). Измерения были проведены в нескольких независимых центрах, включая аналитический центр НЦВО РАН (см. [32]).

2. СВОЙСТВА И ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ИЗУЧЕННЫХ РЭМ И РМЗА ЧАСТИЦ

Разделим условно обнаруженные в объеме ННРС перед цилиндром из олова и в объеме за ним синтезированные структуры на три характерных типа: ленточные, светлые плотные и рыхлые, как бы спрессованные из мелкодисперсных частиц. На рис. 2 приведены РЭМ-изображения в отраженных (а)

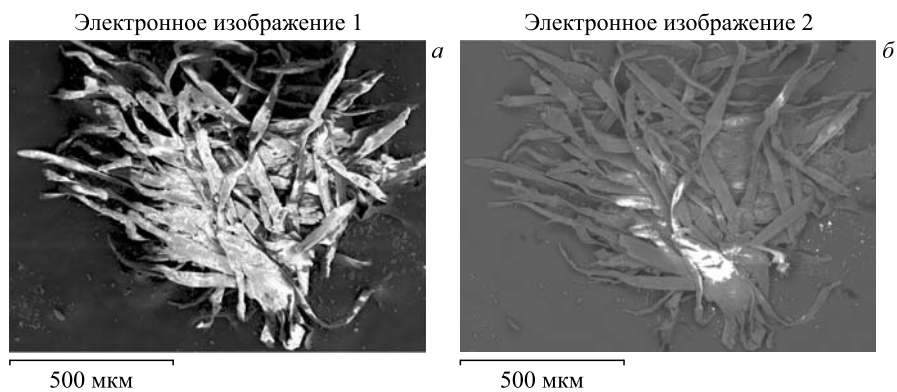


Рис. 2. РЭМ-изображения в отраженных и вторичных электронах как бы клубка из протяженных полос, в двух точках сделан РМЗА (б)

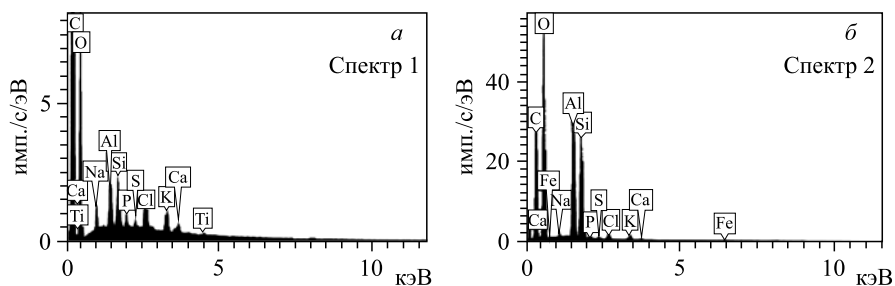


Рис. 3. СХРИ в тт. спектр 1 и спектр 2 на рис. 2, а

Таблица 1. Элементные составы клубка полос на рис. 2, б, соответствующие спектру 1 и спектру 2 на рис. 3, а, б (в верхней строке — в ат. %, в нижней — в вес. %)

O	Na	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe
Спектр 1, рис. 3, а										
80,27	4,26	3,82	3,86	0,96	0,50	3,36	1,91	0,87	0,19	—
68,41	5,22	5,49	5,78	1,58	0,86	6,35	3,98	1,85	0,48	—
Спектр 2, рис. 3, б										
76,74	0,44	10,74	10,72	0,20	0,12	0,42	0,46	0,11	—	0,05
65,35	0,53	15,42	16,02	0,33	0,20	0,79	0,96	0,23	—	0,16

и вторичных (б) электронах (Z-контраст) как бы клубка из протяженных полос с размерами: длиной более 1,26 мм и шириной более 0,80 мм, в двух точках сделан РМЗА (б) со спектрами на рис. 3, а, б.

В табл. 1 представлены элементные составы клубка полос на рис. 2, б, соответствующие спектру 1 и спектру 2 на рис. 3, а, б. Отметим, что при обработке спектров углерод здесь был удален.

Как видно, при исключении углерода из расчета концентраций клубок из полос состоит из кислорода (80,27 и 76,74 ат. %), содержит целый набор элементов от натрия вплоть до кальция, включая и металлы: титан и железо.

На рис. 4 представлено РЭМ-изображение двух так называемых светлых частиц с РМЗА в тт. спектр 3 и спектр 4 (а) и соответствующие им СХРИ (б, в).

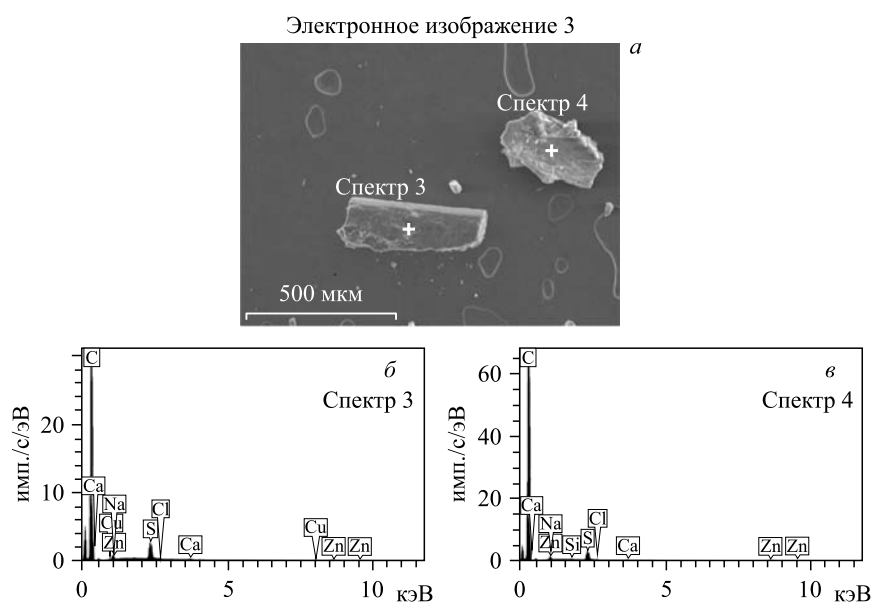


Рис. 4. РЭМ-изображение двух светлых частиц с РМЗА в тт. спектр 3 и спектр 4 (а) и соответствующие им СХРИ (б, в)

Таблица 2. Элементные составы двух светлых частиц на рис. 4, а, соответствующие спектру 3 и спектру 4 на рис. 4, б, в (в верхней строке — в ат. %, в нижней — в вес. %)

Na	Si	S	Cl	Ca	Cu	Zn
Спектр 3, рис. 4, б						
6,47	—	69,36	3,99	5,61	2,20	12,36
4,03	—	60,31	3,83	6,10	3,80	21,92
Спектр 4, рис. 4, в						
7,94	2,55	66,28	3,62	4,55	—	15,07
4,97	1,95	57,83	3,49	4,96	—	26,81

В табл.2 представлены элементные составы двух светлых частиц на рис. 4, *а*, соответствующие спектрам на рис. 4, *б*, *в*. Отметим, что при обработке спектров углерод здесь был также удален.

Как видно, светлые частицы содержат много серы (69,36 и 66,28 ат. %), натрия (6,47 и 7,94 ат. %), кремния (0,0 и 2,55 ат. %), хлора (3,99 и 3,62 ат. %) и кальция (5,61 и 4,55 ат. %), а также меди (2,2 и 0,0 ат.%) и цинка (12,36 и 15,07 ат. %).

На рис.5 представлено РЭМ-изображение двух других светлых частиц с РМЗА в тт. спектр 5 и спектр 6 (*а*) и соответствующие им СХРИ (*б*, *в*).

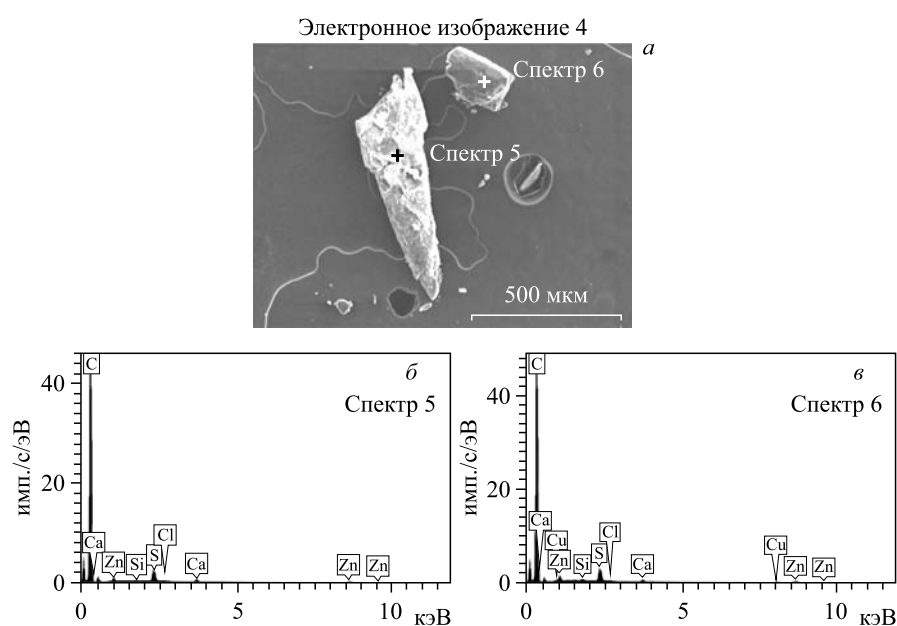


Рис. 5. РЭМ-изображение двух светлых частиц с РМЗА в тт. спектр 5 и спектр 6 (*а*) и соответствующие им СХРИ (*б*, *в*)

Таблица 3. Элементные составы светлых частиц на рис.5, *а*, соответствующие тт. спектр 5 и спектр 6 СХРИ на рис. 5, *б*, *в* (в верхней строке — в ат. %, в нижней — в вес. %)

Si	S	Cl	Ca	Cu	Zn
Спектр 5, рис. 5, <i>б</i>					
2,78	60,00	4,57	16,11	—	16,54
2,01	49,44	4,16	16,59	—	27,79
Спектр 6, рис. 5, <i>в</i>					
5,14	56,98	3,43	10,53	4,14	19,78
3,55	44,88	2,98	10,37	6,46	31,76

В табл.3 представлены элементные составы двух светлых частиц на рис. 5, а, соответствующие тт. спектр 5 и спектр 6 СХРИ на рис. 5, б, в. При обработке спектров углерод здесь был также удален.

Как видно, светлые частицы также содержат много серы (60,00 и 56,98 ат.%), кремния (2,78 и 5,14 ат. %), хлора (4,57 и 3,43 ат. %) и каль-

Электронное изображение 5

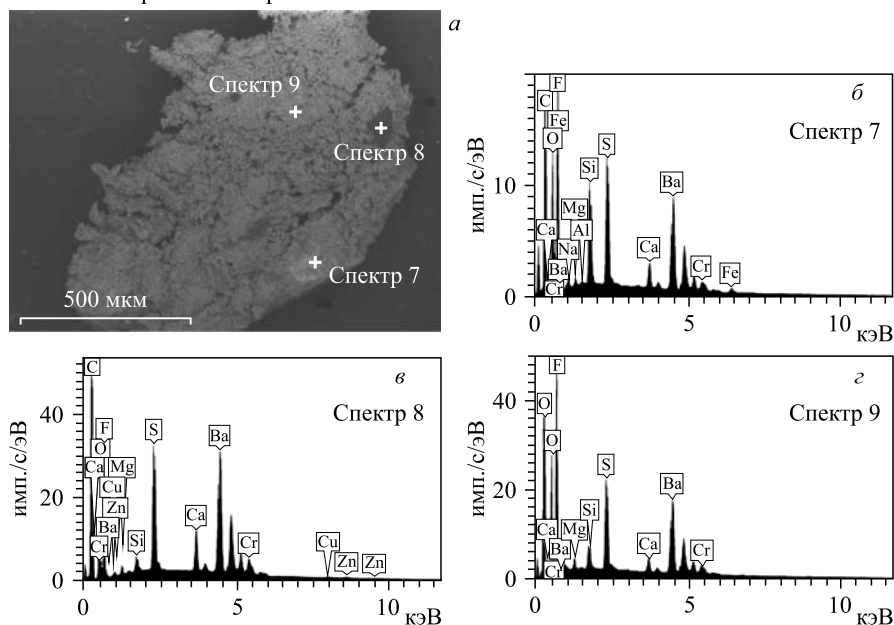


Рис. 6. РЭМ-изображение рыхлой частицы с РМЗА в тт. спектр 7, спектр 8 и спектр 9 (а) и соответствующие им СХРИ (б, в, г)

Таблица 4. Элементные составы рыхлой частицы на рис.6,а, соответствующие тт. спектр 7, спектр 8 и спектр 9 СХРИ на рис.6,б-г (в верхней строке — в ат. %, в нижней — в вес. %)

O	F	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	Cr	Fe	Cu	Zn	Ba
Спектр 7, рис. 6, б												
29,9	43,50	1,26	0,91	0,30	6,85	7,86	1,69	1,01	0,56	—	—	6,92
16,12	28,49	1,00	0,77	0,28	6,64	8,69	2,34	1,80	1,07	—	—	32,80
Спектр 8, рис. 6, в												
21,84	38,70	—	2,04	—	1,72	12,86	4,47	2,65	—	0,24	0,59	14,89
8,71	18,33	—	1,24	—	1,20	10,28	4,47	3,44	—	0,38	0,96	51,00
Спектр 9, рис. 6, г												
27,65	52,54	—	1,65	—	2,10	6,93	1,20	1,07	—	—	—	6,86
15,75	35,55	—	1,43	—	2,10	7,92	1,71	1,98	—	—	—	33,57

ция (16,11 и 10,53 ат. %); а также меди (0,00 и 4,14 ат. %) и цинка (16,54 и 19,78 ат. %). Натрий отсутствует.

Приведем результаты РЭМ- и РМЗА-исследования двух рыхлых частиц. На рис. 6 РЭМ-изображение одной из таких частиц с размерами: длиной более 1 мм и шириной более 0,64 мм с РМЗА в т. спектр 7, спектр 8 и спектр 9 (а) и соответствующие им СХРИ (б, в, г).

В табл. 4 представлены элементные составы рыхлой частицы на рис. 6, а и соответствующие тт. спектр 7, спектр 8 и спектр 9 СХРИ на рис. 6, б, в, г. При обработке спектров углерод здесь был также удален.

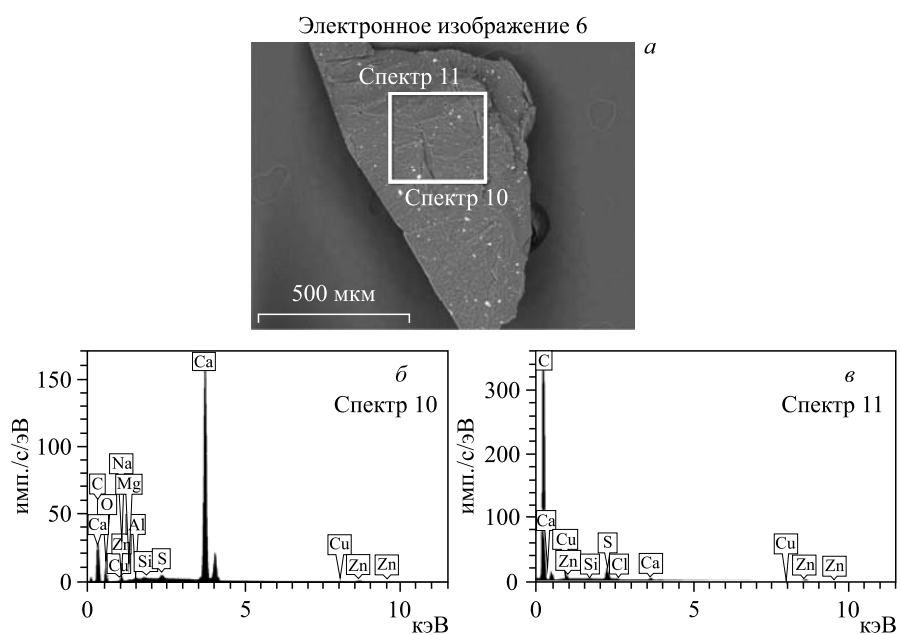


Рис. 7. РЭМ-изображение рыхлой частицы с РМЗА в т. спектр 10 и с площади спектр 11 (а) и соответствующие им СХРИ (б, в)

Таблица 5. Элементные составы рыхлой частицы на рис. 7, а в т. спектр 10 и на площади спектр 11 (в верхней строке — в ат. %, в нижней — в вес. %)

O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	Ca	Cu	Zn
Спектр 10, рис. 7, б									
50,84	0,40	0,14	0,21	0,20	0,54	—	46,33	0,11	1,23
29,07	0,33	0,12	0,21	0,20	0,62	—	66,35	0,24	2,87
Спектр 11, рис. 7, в									
—	—	—	—	4,45	59,16	2,75	12,55	0,85	20,24
—	—	—	—	3,12	47,43	2,43	12,58	1,36	33,08

Из табл. 4 видно, что изученная рыхлая частица имеет элементный состав, который трудно получить химическими методами, следовательно, данная частица действительно является синтезированной в результате ядерных реакций. В частице содержится значительное количество летучего элемента — фтора (43,50, 38,70 и 52,54 ат. %), большое количество бария с зарядом ядра $Z = 56$ (6,92, 14,89 и 6,86 ат. %), значительные количества кремния (6,85, 1,72 и 2,10 ат. %), серы (7,86, 12,86 и 6,93 ат. %), кальция (1,69, 4,47 и 1,20 ат. %), хрома (1,01, 2,65 и 1,07 ат. %), а также железо, медь и цинк. Все эти концентрации рассчитаны при удалении из расчетов углерода, с тем чтобы более отчетливо проявились малые концентрации всех представленных в частице химических элементов.

На рис. 7 показана другая рыхлая частица с размерами: длиной более 1,0 мм и шириной 0,68 мм (*a*), и РМЗА проведен в т. спектр 10 и на площади спектр 11 с соответствующими СХРИ (*б, в*).

В табл. 5 представлены элементные составы рыхлой частицы на рис. 7, *a* и соответствующие т. спектр 10 и площади спектр 11 для СХРИ на рис. 7, *б, в*. При обработке спектров углерод здесь был также удален.

Из табл. 5 видно, что изученная рыхлая частица имеет необычный элементный состав. В частице при проведении РМЗА с разных участков обнаружено значительное количество кислорода (50,84 и 0,0 ат. %), кальция (46,33 и 12,55 ат. %), большое количество кремния (0,20 и 4,45 ат. %), хлора (2,75 ат. %), много цинка (1,23 и 20,24 ат. %), присутствует медь (0,11 и 0,85 ат. %). Все эти концентрации рассчитаны при удалении из расчетов углерода, с тем чтобы более отчетливо проявились малые концентрации всех представленных в частице химических элементов.

На рис. 8, *a* дано РЭМ-изображение частицы с длиной более 0,83 мм и шириной 0,33 мм (*a*) и ее участок с большим увеличением (*б*). РМЗА проведен в тт. спектр 5, спектр 6 (рис. 8, *a*); тт. спектр 7, спектр 8, спектр 9 и на площади спектр 10 (рис. 8, *б*). В табл. 6 представлены элементные составы, измеренные в тт. спектр 5 и спектр 6, а в табл. 7 приведены элементные составы, измеренные в тт. спектр 7, спектр 8, спектр 9 и на площади спектр 10.

Как видно, в этой частице содержится очень много углерода (93,12 и 94,56 ат. %) наряду с присутствием и легких элементов от кислорода до кальция, а также меди и цинка.

На рис. 9, *a* представлено РЭМ-изображение частицы с длиной $\approx 0,46$ мм и шириной $\approx 0,39$ мм (*a*). РМЗА проведен в тт. спектр 12, спектр 13 и спектр 14, а объединенный спектр СХРИ в этих точках представлен на рис. 9, *б*. В табл. 8 приведены соответствующие элементные составы.

Из табл. 8 видно, что в частице на рис. 9 присутствуют углерод (48,24, 55,69 и 13,08 ат. %), в значительных количествах барий (12,34, 18,40 и 1,36 вес. %), а также кислород (до 56,82 вес. %), фтор (22,65 и 22,93 вес. %),

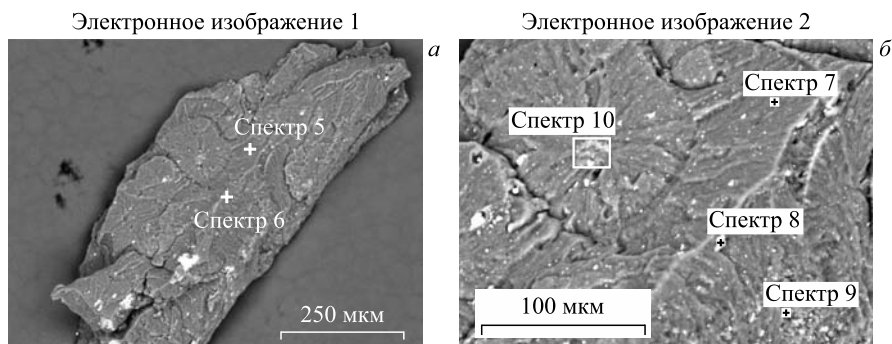


Рис. 8. РЭМ-изображение плотной частицы с РМЗА (а) и ее часть с большим увеличением (б)

Таблица 6. Элементные составы частицы на рис. 8, а, измеренные в тт. спектр 5 и спектр 6 (в верхней строке — в вес. %, в нижней — в ат. %)

C	O	Si	S	Cl	Ca	Cu	Zn
Спектр 5, рис. 8, а							
89,71	7,97	0,04	1,01	0,04	0,08	—	1,15
93,12	6,21	0,02	0,39	0,02	0,02	—	0,22
Спектр 6, рис. 8, а							
90,20	4,85	0,10	2,94	0,14	0,22	0,16	1,39
94,56	3,82	0,04	1,16	0,05	0,07	0,03	0,27

Таблица 7. Элементные составы частицы на рис. 8, а, измеренные в тт. спектр 7, спектр 8, спектр 9 и на площади спектр 10 (в верхней строке — в вес. %, в нижней — в ат. %)

C	O	Na	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Cu	Zn
Спектр 7, рис. 8, б										
89,28	8,35	—	0,01	0,03	0,98	0,04	—	0,06	0,04	1,22
92,81	6,52	—	0,01	0,01	0,38	0,01	—	0,02	0,01	0,23
Спектр 8, рис. 8, б										
34,73	36,9	—	—	0,05	0,24	0,05	—	27,23	0,18	0,62
49,01	39,09	—	—	0,03	0,13	0,02	—	11,51	0,05	0,16
Спектр 9, рис. 8, б										
88,68	4,85	—	—	0,18	3,31	0,29	—	0,58	1,09	1,01
94,03	3,86	—	—	0,08	1,32	0,10	—	0,19	0,22	0,20
Спектр 10, рис. 8, б										
91,9	4,36	0,21	0,04	0,22	0,94	0,05	0,02	0,17	0,07	2,02
95,52	3,40	0,11	0,02	0,10	0,37	0,02	0,01	0,05	0,01	0,39

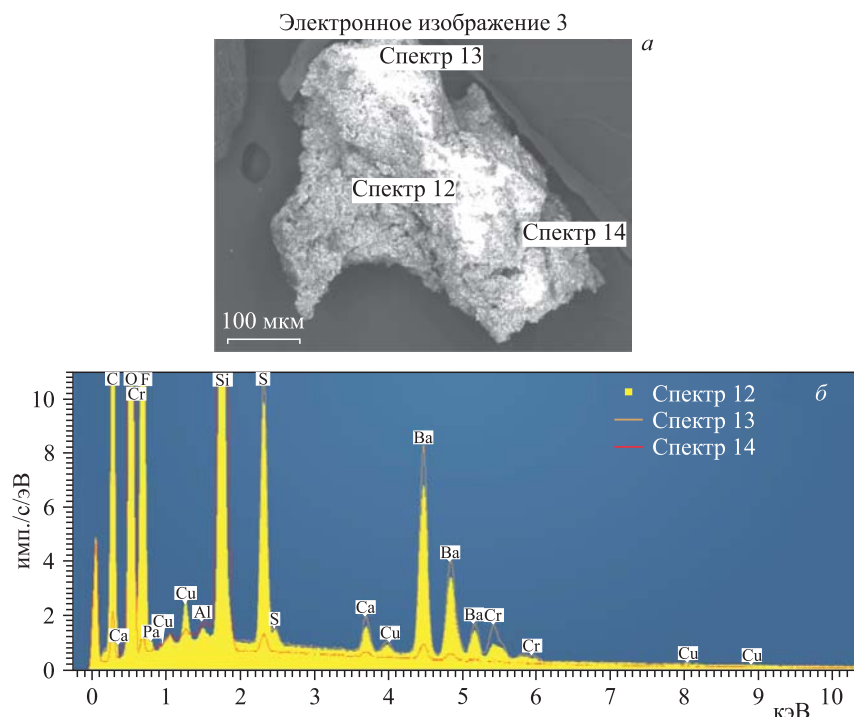


Рис. 9. РЭМ-изображение частицы (а) с РМЗА в т. спектр 10 и объединенный СХРИ (б) в тт. спектр 12, спектр 13 и спектр 14

Таблица 8. Элементные составы частицы на рис.9, а, измеренные в тт. спектр 12, спектр 13 и спектр 14 (в верхней строке — в вес. %, в нижней — в ат. %)

C	O	F	Mg	Al	Si	S	Ca	Cr	Cu	Ba
Спектр 12, рис.9										
32,89	20,00	22,65	0,58	0,11	7,29	3,03	0,46	0,56	0,09	12,34
48,24	22,02	21,00	0,42	0,07	4,58	1,67	0,20	0,19	0,02	1,58
Спектр 13, рис.9										
36,70	13,33	22,93	0,70	0,18	1,12	4,17	0,77	1,55	0,15	18,40
55,69	15,18	22,00	0,53	0,12	0,73	2,37	0,35	0,54	0,04	2,44
Спектр 14, рис.9										
8,57	56,82	—	—	—	32,75	0,30	0,12	0,08	—	1,36
13,08	65,11	—	—	—	21,38	0,17	0,05	0,03	—	0,18

кремний (7,29, 1,12 и 32,75 вес. %), сера (3,03, 4,17 и 0,30 вес. %), хром (0,56, 1,55 и 0,08 вес. %) и другие элементы. В целом состав этой частицы такой же разнообразный, как и частицы, представленной на рис. 6, а (см. табл. 4).

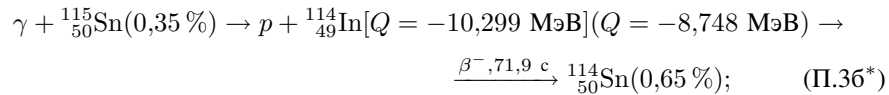
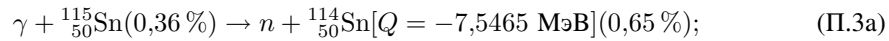
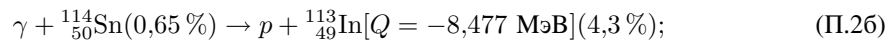
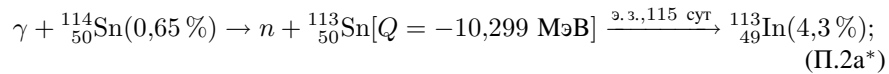
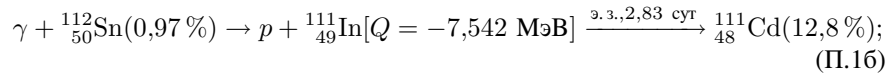
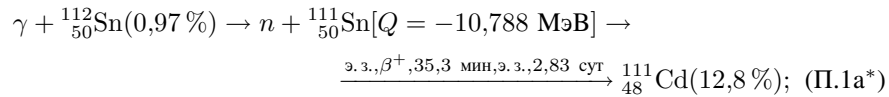
ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

РЭМ- и РМЗА-исследования трех видов синтезированных частиц: ленточных, светлых плотных и рыхлых, как бы спрессованных из мелкодисперсных частиц, позволили установить их структуру и элементный состав. Было показано (см. табл. 1, рис. 2, *a*), что клубки из полос содержат углерод, кислород, натрий, алюминий, кремний, фосфор, серу, хлор, калий, кальций, титан и железо. Светлые плотные частицы (см. табл. 2 и 3, рис. 4 и 5) состоят из натрия, кремния, серы, хлора, кальция, меди и цинка. А рыхлые частицы (см. табл. 4, 5 и 8, рис. 6, 7 и 9) состоят из кислорода, фтора, натрия, магния, алюминия, кремния, серы, кальция, хрома, железа, меди, цинка и бария. Отметим, что на сборнике продуктов реакций (рис. 1, поз. 3) в работе [27] также обнаружены структуры вида полос, а на поверхностях цилиндра из олова обнаружены шарики из меди и ряда других химических элементов.

В приложении дана часть возможных реакций, которые могли бы привести к обнаруженному элементному составу частиц и других объектов внутри ННРС, детально описанных в [27].

ПРИЛОЖЕНИЕ. ФОТОЯДЕРНЫЕ (γ, n) - И (γ, p) -РЕАКЦИИ СИНТЕЗА И РЕАКЦИИ ДЕЛЕНИЯ ОЛОВА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТОРМОЗНЫХ γ -КВАНТОВ С ПОРОГОВОЙ ЭНЕРГИЕЙ 10 МэВ

Приведем реакции ${}^{N+50}_{50}\text{Sn}(\gamma, n){}^{(N-1)+50}_{50}\text{Sn}$ и ${}^{N+50}_{50}\text{Sn}(\gamma, p){}^{N+49}_{49}\text{In}^*$; здесь N — число нейтронов в ядре олова с $Z = 50$, на десяти природных изотопах олова [39, 40]: ${}^{112}_{50}\text{Sn}(0,97\%)$, ${}^{114}_{50}\text{Sn}(0,65\%)$, ${}^{115}_{50}\text{Sn}(0,36\%)$, ${}^{116}_{50}\text{Sn}(14,53\%)$, ${}^{117}_{50}\text{Sn}(7,68\%)$, ${}^{118}_{50}\text{Sn}(24,22\%)$, ${}^{119}_{50}\text{Sn}(8,58\%)$, ${}^{120}_{50}\text{Sn}(32,59\%)$, ${}^{122}_{50}\text{Sn}(4,63\%)$ и ${}^{124}_{50}\text{Sn}(5,79\%)$:



$$\gamma + {}^{116}_{50}\text{Sn}(14,53\%) \rightarrow n + {}^{115}_{50}\text{Sn}[Q = -9,562 \text{ МэВ}](0,36\%); \quad (\text{П.4a})$$

$$\gamma + {}^{116}_{50}\text{Sn}(14,53\%) \rightarrow p + {}^{115}_{49}\text{In} + p[Q = -12,274 \text{ МэВ}](4,41 \cdot 10^{14} \text{ лет}, 95,7\%); \quad (\text{П.4б}^*)$$

$$\gamma + {}^{117}_{50}\text{Sn}(7,68\%) \rightarrow n + {}^{116}_{50}\text{Sn}[Q = -6,944 \text{ МэВ}](14,53\%); \quad (\text{П.5a})$$

$$\gamma + {}^{117}_{50}\text{Sn}(7,68\%) \rightarrow p + {}^{116}_{49}\text{In}[Q = -9,4349 \text{ МэВ}] \xrightarrow{\beta^-, 10 \text{ с}} {}^{116}_{50}\text{Sn}(14,53\%); \quad (\text{П.5б})$$

$$\gamma + {}^{118}_{50}\text{Sn}(24,22\%) \rightarrow n + {}^{117}_{50}\text{Sn}[Q = -9,326 \text{ МэВ}](7,68\%); \quad (\text{П.6a})$$

$$\gamma + {}^{118}_{50}\text{Sn}(24,22\%) \rightarrow p + {}^{117}_{49}\text{In}[Q = -9,9986 \text{ МэВ}] \xrightarrow{\beta^-, 2,49 \text{ ч}} {}^{117}_{50}\text{Sn}(7,68\%); \quad (\text{П.6б}^*)$$

$$\gamma + {}^{119}_{50}\text{Sn}(8,58\%) \rightarrow n + {}^{118}_{50}\text{Sn}[Q = -6,4845 \text{ МэВ}](24,22\%); \quad (\text{П.7a})$$

$$\gamma + {}^{119}_{50}\text{Sn}(8,58\%) \rightarrow p + {}^{118}_{49}\text{In}[Q = -9,9057 \text{ МэВ}] \xrightarrow{\beta^-, 5,0 \text{ с}} {}^{118}_{50}\text{Sn}(24,22\%); \quad (\text{П.7б}^*)$$

$$\gamma + {}^{120}_{50}\text{Sn}(32,59\%) \rightarrow n + {}^{119}_{50}\text{Sn}[Q = -9,1065 \text{ МэВ}](8,58\%); \quad (\text{П.8a})$$

$$\gamma + {}^{120}_{50}\text{Sn}(32,59\%) \rightarrow p + {}^{119}_{49}\text{In}[Q = -10,6608 \text{ МэВ}] \rightarrow \xrightarrow{\beta^-, 2,4 \text{ мин}} {}^{119}_{50}\text{Sn}(8,58\%); \quad (\text{П.8б}^*)$$

$$\gamma + {}^{122}_{50}\text{Sn}(4,63\%) \rightarrow n + {}^{121}_{50}\text{Sn}[Q = -8,8156 \text{ МэВ}] \rightarrow \xrightarrow{\beta^-, 27,06 \text{ ч}} {}^{121}_{51}\text{Sb}(57,39\%); \quad (\text{П.9a})$$

$$\gamma + {}^{122}_{50}\text{Sn}(4,63\%) \rightarrow p + {}^{121}_{49}\text{In} + p[Q = -11,393 \text{ МэВ}] \rightarrow \xrightarrow{\beta^-, \beta^-, 23,1 \text{ с}; 27,06 \text{ ч}} {}^{121}_{51}\text{Sb}(57,3\%); \quad (\text{П.9б}^*)$$

$$\gamma + {}^{124}_{50}\text{Sn}(5,79\%) \rightarrow n + {}^{123}_{50}\text{Sn}[Q = 8,490 \text{ МэВ}] \xrightarrow{\beta^-, 129,2 \text{ сут}} {}^{123}_{51}\text{Sb}(42,7\%); \quad (\text{П.10a})$$

$$\gamma + {}^{124}_{50}\text{Sn} \rightarrow p + {}^{123}_{49}\text{In}[Q = -12,089 \text{ МэВ}] \rightarrow \xrightarrow{\beta^-, \beta^-, 5,98 \text{ с}; 129,2 \text{ сут}} {}^{123}_{51}\text{Sb}(42,7\%); \quad (\text{П.10б}^*)$$

В реакциях (П.1)–(П.9) «*» помечены реакции, которые не могут протекать, так как энергии γ -квантов $E_\gamma < |Q|$.

Приведем теперь реакции асимметричного деления ядер олова (см., например, работы [29–31]) при подбарьерном слиянии с протоном, который может при упругом рассеянии на нем γ -кванта с энергией E_γ приобрести

максимальную энергию [19, 32]:

$$E_M^{\max} = E_\gamma \left(1 + \frac{Mc^2}{2E_\gamma} \right)^{-1}, \quad (\text{П.11})$$

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

$$\begin{aligned} E_{\text{H}}^{\max}(10 \text{ МэВ}) &= 208,6 \text{ кэВ}; & E_{\text{H}}^{\max}(25 \text{ МэВ}) &= 1,264 \text{ кэВ}; \\ E_{\text{H}_2}^{\max}(10 \text{ МэВ}) &= 105,4 \text{ кэВ}, & E_{\text{H}_2}^{\max}(25 \text{ МэВ}) &= 665,5 \text{ кэВ}. \end{aligned} \quad (\text{П.12})$$

Сечения прямого рассеяния γ -кванта на ядрах малы (см., например, [17, 18]). Но при взаимодействии γ -квантов происходят непрямые процессы при их взаимодействии с атомами мишени, такие как: фотоэффект, эффект Комптона и рождение $e^- - e^+$ -пар [18, 17], в результате которых образуются высокоэнергетические электроны и позитроны, также способные нагревать атомы и молекулы водорода.

Отметим, что максимально переданные энергии в (П.10) можно представить в виде максимальных температур атомов и молекул водорода $T_{\text{H, H}_2}^{\max} = \frac{2}{3} E_{\text{H, H}_2}^{\max} / k_{\text{B}}$, где $k_{\text{B}} = 8,617 \cdot 10^{-5}$ эВ/К.

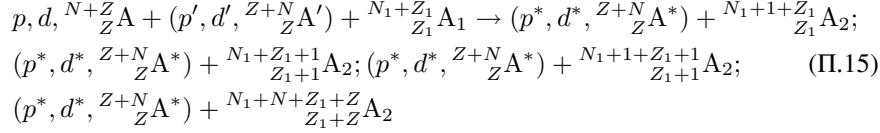
$$\begin{aligned} T_{\text{H}}^{\max}(10 \text{ МэВ}) &= 1,61 \cdot 10^9 \text{ К}; & T_{\text{H}}^{\max}(25 \text{ МэВ}) &= 9,78 \cdot 10^9 \text{ К}; \\ E_{\text{H}_2}^{\max}(10 \text{ МэВ}) &= 0,815 \cdot 10^9 \text{ К}, & T_{\text{H}_2}^{\max}(25 \text{ МэВ}) &= 5,15 \cdot 10^9 \text{ К}. \end{aligned} \quad (\text{П.13})$$

Как известно, температура на поверхности Солнца составляет 5800 К, а в центре Солнца — $15,6 \cdot 10^6$ К [33]. В нашем случае локальная температура может быть значительно выше (см. выражения (П.13)), поэтому реакции на протонах, так называемое выгорание водорода по гелиевому циклу Бете [33–35], может происходить (как известно, $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$ реакция протекает со слабым взаимодействием с предельно малыми вероятностями, см. также монографию [36]).

В работах [37] и [38] развита модель внутренней твердотельной конверсии, сделаны расчеты и показано, что возможны процессы подбарьерного слияния протонов, дейтронов и ядер с ядрами твердого тела, когда при так называемой внутренней конверсии энергия возбуждения составного ядра в реакциях типа

$$\begin{aligned} p, d, {}^{N+Z}_{Z_1}A + {}^{N_1+Z_1}_{Z_1}A_1 &\rightarrow \gamma + {}^{N_1+1+Z_1}_{Z_1}A_2; \gamma + {}^{N_1+Z_1+1}_{Z_1+1}A_2; \\ \gamma + {}^{N_1+1+Z_1+1}_{Z_1+1}A_2; \gamma + {}^{N_1+N+Z_1+Z}_{Z_1+Z}A_2 \end{aligned} \quad (\text{П.14})$$

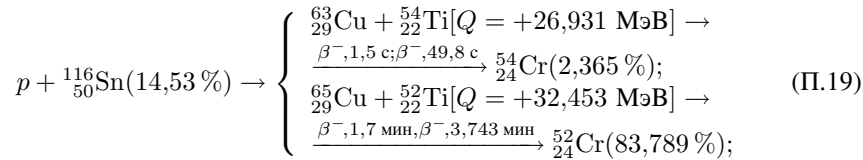
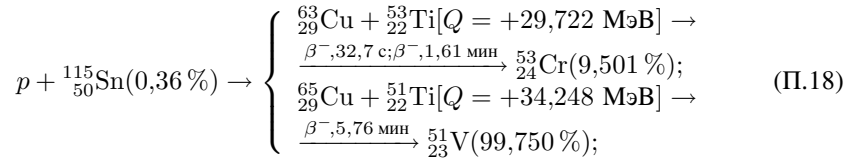
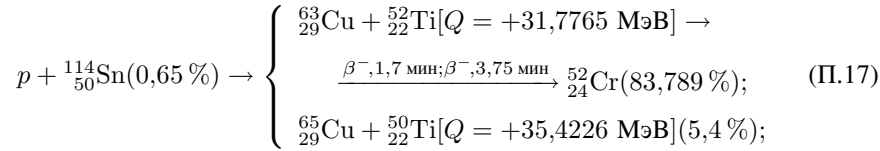
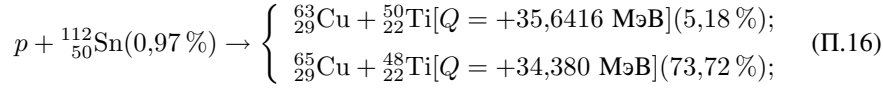
не снимается испусканием γ -кванта, а передается третьей заряженной частице p , d или ядру решетки твердого тела ${}^Z_{Z+N}A$, т. е. протекают реакции вида

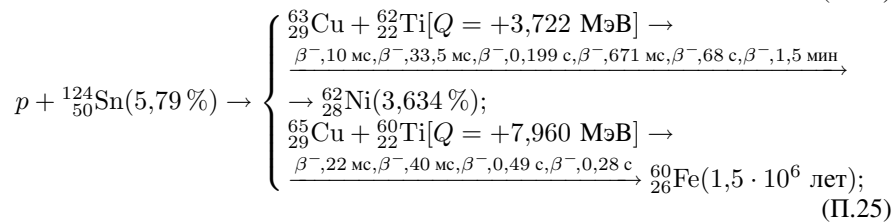
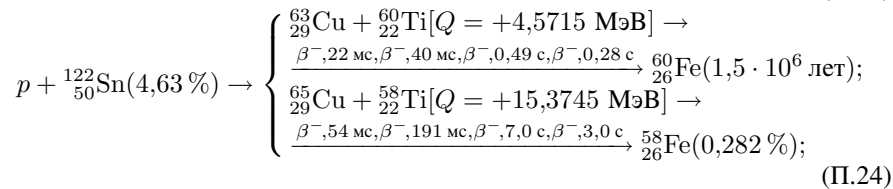
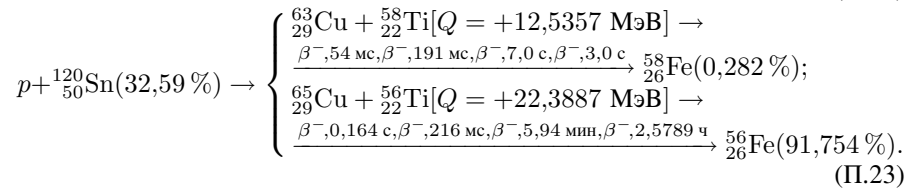
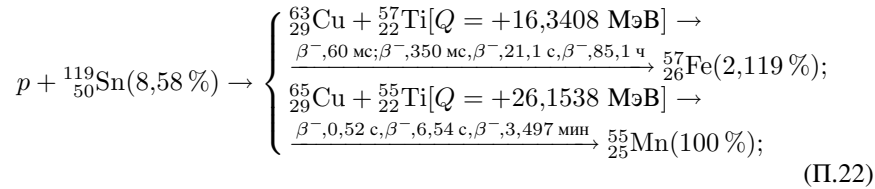
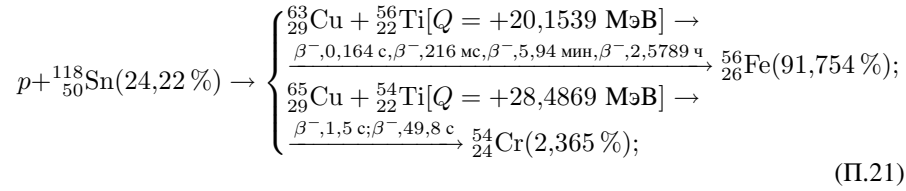
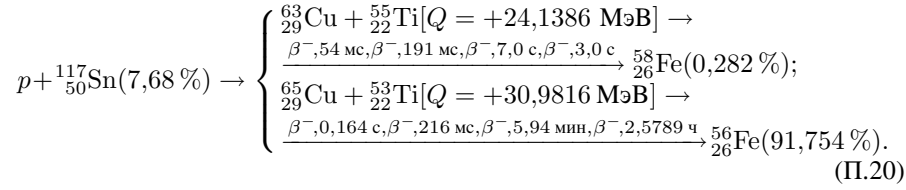


Ясно, что при этом сопутствующие частицы: p , d или ядро решетки твердого тела ${}^Z_{Z+N}A$, приобретают значительные энергии.

Тем не менее исследования изменений элементных составов с образованием микрочастиц при воздействии тормозных γ -квантов с пороговой энергией 10 МэВ в плотном водороде (при давлениях 0,5, 1,0, 2,5, 3,5 кбар) (см. [20–23], [19] и [27]), как и в плотном гелии (при давлениях 1,1 и 3,05 кбар) (см. [24, 25, 28]), показали, что реакции синтеза (восходящие реакции) и деления (нисходящие реакции), по-видимому, имеют место.

Как видно из результатов РМЗА, присутствуют два типа шариков, состоящих преимущественно из меди или из железа. Поэтому запишем возможные реакции, которые могут привести к образованию меди и железа. Будем рассматривать принципиально существующие и не противоречащие законам сохранения подбарьерные реакции слияния ускоренных ядер и ядер олова, с десятью его изотопами, такими как ${}^{112}_{50}\text{Sn}(0,97\%)$, ${}^{114}_{50}\text{Sn}(0,65\%)$, ${}^{115}_{50}\text{Sn}(0,36\%)$, ${}^{116}_{50}\text{Sn}(14,53\%)$, ${}^{117}_{50}\text{Sn}(7,68\%)$, ${}^{118}_{50}\text{Sn}(24,22\%)$, ${}^{119}_{50}\text{Sn}(8,58\%)$, ${}^{120}_{50}\text{Sn}(32,59\%)$, ${}^{122}_{50}\text{Sn}(4,63\%)$ и ${}^{124}_{50}\text{Sn}(5,79\%)$:

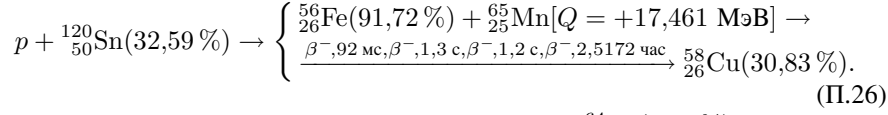




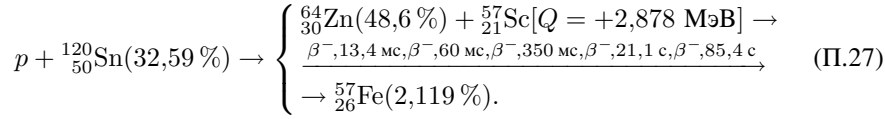
Как видно, в приведенных выше реакциях (П.15)–(П.25) могут образовываться следующие элементы: ${}^{63}_{29}\text{Cu}$, ${}^{65}_{29}\text{Cu}$, ${}^{48}_{22}\text{Ti}$, ${}^{50}_{22}\text{Ti}$, ${}^{51}_{23}\text{V}$, ${}^{52}_{24}\text{Cr}$, ${}^{53}_{24}\text{Cr}$, ${}^{54}_{24}\text{Cr}$, ${}^{55}_{25}\text{Mn}$, ${}^{56}_{26}\text{Fe}$, ${}^{57}_{26}\text{Fe}$, ${}^{58}_{26}\text{Fe}$, ${}^{60}_{26}\text{Fe}$ и ${}^{62}_{28}\text{Ni}$ при асимметричном делении олова в реакции подбарьерного слияния с протонами.

Аналогично можно написать реакции наработки наиболее распространенного в природе изотопа ${}^{56}_{26}\text{Fe}(91,72\%)$ в реакции подбарьерного слияния

протонов с наиболее распространенным в природе ядром $^{120}_{50}\text{Sn}(32,59\%)$:

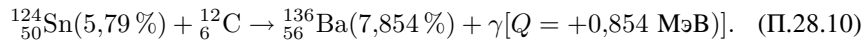
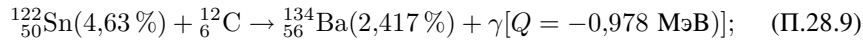
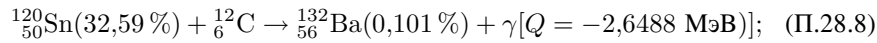
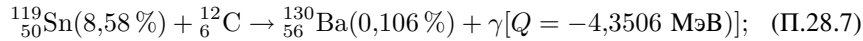
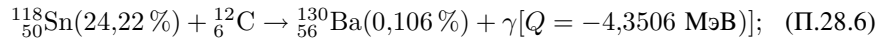
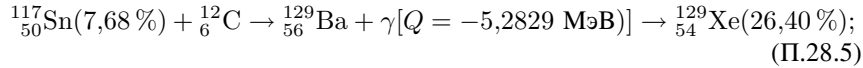
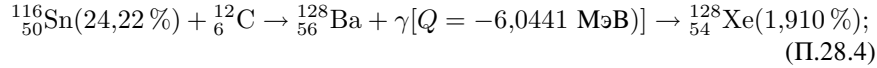
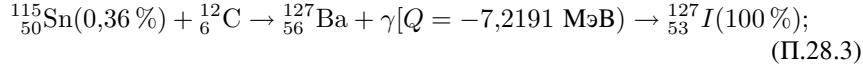
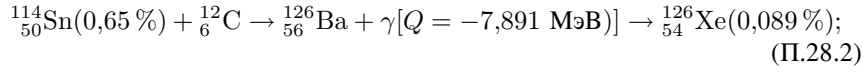
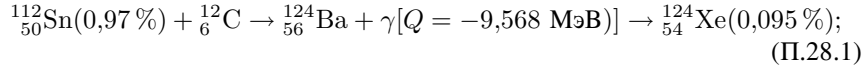


Приведем для примера реакцию с наработкой $^{64}_{30}\text{Zn}(48,6\%)$:



Таким образом, можно написать реакции, не противоречивые с точки зрения законов сохранения таких элементов, как барий ($Z = 56$), кремний ($Z = 14$), сера ($Z = 16$), кальций ($Z = 20$), которые встречаются в значительных количествах в синтезированных частицах и на поверхностях цилиндра из олова и камеры ННРС (см. [27]).

Образование $^{56}_{56}\text{Ba}$ можно описать через реакции подбарьерного слияния изотопов $^{50}_{50}\text{Sn}$ с углеродом (П.11), (П.12):



Другие реакции изотопов олова с углеродом не приводят к образованию стабильных изотопов бария. Как видно из выражений (П.27.1)–(П.27.10), только реакция (П.25.10) имеет положительное значение Q реакции. Видимо, только эта реакция и возможна [39, 40]. Следовательно, измерение массового

изотопного содержания бария могло бы дать ответ, какие реакции имели место при образовании бария. Также при этих реакциях образуются ксенон (летучий газ) и йод.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Didyk A. Yu., Wisniewski R.* Nuclear Reactions, Induced by Gamma Quanta, in Palladium Saturated with Deuterium Surrounded by Dense Deuterium Gas // European Physics Letters (EPL). 2012. 99. P. 22001–P1–22001-P6.
2. *Didyk A. Yu., Wisniewski R.* Nuclear Reactions in Deuterium-Saturated Palladium under Irradiation by 10 MeV γ -Quanta in Dense Molecular Deuterium at 1.2 kbar Pressure // Europe Physics Letters. 2013. V. 103. P. 42002-P1–42002-P6.
3. *Didyk A. Yu., Wisniewski R.* Chemical Composition and Structural Phase Changes of Novel Synthesized Structure and of Pd Sample under γ -Quanta Irradiation in Dense Deuterium Gas // Phys. Part. Nucl. Lett. 2012. V. 9, No. 8. P. 615–631; JINR Preprint E15-2012-34. Dubna, 2012. 26 p.
4. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П.* Синтез новых структур в плотном газообразном дейтерии и насыщенном дейтерием палладии при ядерных реакциях, инициированных γ -квантами // Физика и химия обработки материалов. 2012. №5. С. 5–13; Препринт ОИЯИ P15-2012-50. Дубна, 2012. 16 с.
5. *Didyk A. Yu., Wisniewski 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 // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2013. V. 7. No. 2. P. 239–247.
6. *Didyk A. Yu., Wisniewski 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.
7. *Didyk A. Yu., Wisniewski 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; *Дидык А. Ю., Вишневецкий П., Вилчинска-Китовска Т.* Препринт ОИЯИ P15-2013-15. Дубна, 2013. 39 с.
8. *Didyk A. Yu., Wisniewski 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; *Дидык А. Ю., Вишневецкий П., Вилчинска-Китовска Т.* Препринт ОИЯИ P15-2013-20. Дубна, 2013. 32 с.
9. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П.* Ядерные реакции в насыщенном дейтерием палладии и рении в атмосфере плотного дейтерия при облучении γ -квантами непрерывного спектра с граничной энергией 23 МэВ // Письма в ЭЧАЯ. 2012. №5. С. 5–13; Препринт ОИЯИ P15-2012-63. Дубна, 2012. 22 с.

10. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Properties of Hydrogen and Its Isotopes under High Pressure, and Technological Applications. Dubna, JINR, 2013, 320 p. Monograph, ISBN 978-5-9530-0358-2.
11. *Wiśniewski R., Didyk A. Yu., Wilczyńska-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 // *J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* 2013. V. 7, No. 2. P. 239–247.
12. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р., Вилчинска-Китовска Т.* Реакции фоторасщепления дейтрона, термоядерного синтеза и деления ядер, индуцированные γ -квантами в насыщенном дейтерием палладии и плотном газообразном дейтерии с синтезом новых структур // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* 2013. № 3. С. 1–9.
13. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R., Wilczyńska-Kitowska T., Shilov V. M.* Changes in the Chemical Composition of Nuclear Reaction Products Irradiated with 100 MeV γ Quanta in Deuterium Saturated Palladium. // *J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* 2014. V. 8, No. 6. P. 1100–1112.
14. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* Ядерные реакции в насыщенном дейтерием палладии и рении в атмосфере плотного дейтерия при облучении γ -квантами непрерывного спектра с граничной энергией 23 МэВ // *Письма в ЭЧАЯ.* 2012. № 5. С. 5–13; *Препринт ОИЯИ Р15-2012-63.* Дубна, 2012. 22 с.
15. *Didyk A. Yu., Wisniewski R.* The Study of Changes in the Element Compositions of Pd and Re Specimens Irradiated in Dense Gaseous Deuterium by γ Quanta with Boundary Energy up to 23 MeV // *J. Phys. Sci. Appl.* 2013. V. 3(4). P. 209–217.
16. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* Изменения поверхности, объемных свойств образцов ванадия и нержавеющей стали, облученных в плотном газообразном дейтерии γ -квантами с пороговой энергией 23 МэВ. *Препринт ОИЯИ Р15-2012-75.* Дубна, 2012. 15 с.
17. *Дидык А. Ю., Вишневецкий 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 Р15-2013-41.* Дубна: ОИЯИ, 2013. 22 с.; *Письма в ЭЧАЯ.* 2014. Т. 11, № 3(187). С. 284–298.
18. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* Результаты по облучению нержавеющей стали и меди γ -квантами с энергией 23 МэВ в атмосфере молекулярного дейтерия при давлении 2 кбар. *Препринт ОИЯИ Р15-2013-42.* Дубна: ОИЯИ, 2013. 28 с.; *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2014. No. 3. P. 309–328.
19. *Didyk A. Yu., Wisniewski K.* Structure and Chemical Composition Changes of Pd Rod and Reaction Product Collector Irradiated by 10 MeV Braking Gamma Quanta inside High Pressure Chamber Filled with 2.5 kbar Molecular Hydrogen // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2014. V. 11, No. 4. P. 513–527; *Препринт ОИЯИ Р15-2013-80.* Дубна, 2013. 32 с.
20. *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. 34 с.; Письма в ЭЧАЯ. 2015 (в печати).
21. *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. 24 с.; Письма в ЭЧАЯ. 2015 (в печати).
 22. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* Синтез микрочастиц в молекулярном водороде при давлении 1 кбар при ядерных реакциях под действием тормозных γ -квантов с пороговой энергией 10 МэВ. Химический состав и структуры на внутренних поверхностях компонент камеры высокого давления. Препринт ОИЯИ Р15-2014-2. Дубна, 2014. 44 с.; Письма в ЭЧАЯ. 2015 (в печати).
 23. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* Синтез микрочастиц в молекулярном водороде при давлении 1 кбар при ядерных реакциях под действием тормозных γ -квантов с пороговой энергией 10 МэВ. Химический состав синтезированных частиц и структур на поверхности реакционной камеры. Препринт ОИЯИ Р15-2014-3. Дубна, 2014. 44 с.; Письма в ЭЧАЯ. 2015 (в печати).
 24. *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 Р15-2014-38. Дубна, 2014. 20 с.; Письма в ЭЧАЯ. 2015 (в печати).
 25. *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 Р15-2014-50. Дубна, 2014. 40 с.; Письма в ЭЧАЯ. 2015 (в печати).
 26. *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. 25 p.
 27. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* Ядерные реакции с синтезом структур в ННРС при давлении 3,5 кбар водорода с цилиндром из олова под действием облучения тормозными γ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ. Препринт ОИЯИ Р15-2014-86. Дубна, 2014. 43 с.; Письма в ЭЧАЯ. 2015 (в печати).
 28. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* Синтез новых структур и образование химических элементов в плотном гелии при давлении 3,05 кбар при облучении тормозными γ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ. Препринт ОИЯИ Р15-2014-85. Дубна, 2014. 43 с.; Письма в ЭЧАЯ. 2015 (в печати).
 29. *Moretto Luciano G.* Statistical Emission of Large Fragments: A General Theoretical Approach // *Nucl. Phys. A.* 1975. V. 247. P. 211–230.
 30. *Sierk A. J.* Mass-Asymmetric Fission of Light Nuclei // *Phys. Rev.* 1985. V. 55, No. 6. P. 582–583.
 31. *Sierk A. J.* Macroscopic Model of Rotating Nuclei // *Phys. Rev. C.* 1986. V. 33, No. 6. P. 2039–2052.

32. Углов В. В. Радиационные эффекты в твердых телах. Минск: БГУ, 2011. 207 с.
33. dic.academic.ru/dic.nsf/enc.colier/5805/Солнце
34. *Bethe H. A.* Energy Production in Stars // *Phys. Rev.* 1939. V. 55. March, 1. P. 434–456.
35. *Gamov G.* Nuclear Energy Sources and Stellar Evolution // *Phys. Rev.* 1938. V. 53. P. 595–604.
36. *Ишханов Б. С., Капитонов И. М., Тутынь И. А.* Нуклеосинтез во Вселенной. М.: Либроком, 2009; <http://nuclphysinpmsuru/nuclsynthtml>
37. *Kálmán P., Keszthelyi T.* Solid State Internal Conversion // *Phys. Rev. C.* 2004. V. 69. 031606(R). 031606-1–031606-3.
38. *Kálmán P., Keszthelyi T.* Lattice Effect in Solid State Internal Conversion // *Phys. Rev. C.* 2009. V. 79. 031602(R). P. 031602-1–031606-4.
39. *Голашвили Т. В., Чечев В. П., Бадиков С. А.* Справочник нуклидов. М.: Издательский дом МЭИ, 2011. 461 с.
40. Физические величины. Справочник под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1234 с.

Получено 18 ноября 2014 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 04.03.2015.

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

Усл. печ. л. 1,44. Уч.-изд. л. 1,75. Тираж 225 экз. Заказ № 58480.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/