

А. Ю. Дидык, Р. Вишневецкий^{1,*}, Г. В. Мышинский^{**},
В. А. Семин, Т. Вилчиньска-Китовска¹

СИНТЕЗ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР
И ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ
ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ТОРМОЗНЫМИ γ -КВАНТАМИ
С $E_{\max} = 10$ МэВ КОНДЕНСИРОВАННОГО
ДЕЙТЕРИЯ ДАВЛЕНИЕМ 2,2 КБАР

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

¹ Варшавский технологический университет (Politechnika Warszawska),
Варшава, Польша

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

** E-mail: mysh@jinr.ru

Дидык А. Ю. и др.

P15-2018-3

Синтез твердотельных структур и химических элементов при облучении тормозными γ -квантами с $E_{\max} = 10$ МэВ конденсированного дейтерия давлением 2,2 кбар

Камера высокого давления дейтерия (ДНРС) (2,2 кбар) облучалась тормозными γ -квантами с максимальной энергией 10 МэВ в течение 49 ч. После облучения из ДНРС выпало несколько частиц с размерами до 1 мм. На внутренних поверхностях ДНРС были обнаружены вновь образовавшиеся твердотельные микрообъекты в виде кристаллических и аморфных микрочастиц, нитей, наплывов и вкраплений. Исследования элементного состава выявленных структур, проведенные с помощью рентгеновского микрозондового анализа, показали наличие в них химических элементов, отсутствующих в реакционной камере до облучения. Зарегистрированы химические элементы: ${}^6\text{C}$, ${}^7\text{N}$, ${}^8\text{O}$, ${}^{11}\text{Na}$, ${}^{12}\text{Mg}$, ${}^{13}\text{Al}$, ${}^{14}\text{Si}$, ${}^{15}\text{P}$, ${}^{16}\text{S}$, ${}^{17}\text{Cl}$, ${}^{19}\text{K}$, ${}^{20}\text{Ca}$, ${}^{21}\text{Sc}$, ${}^{22}\text{Ti}$, ${}^{24}\text{Cr}$, ${}^{25}\text{Mn}$, ${}^{26}\text{Fe}$, ${}^{28}\text{Ni}$, ${}^{30}\text{Zn}$, ${}^{33}\text{As}$, а также олово ${}^{50}\text{Sn}$ и свинец ${}^{82}\text{Pb}$. Проведенный эксперимент по синтезу химических элементов в дейтерии подтверждает результаты предыдущих экспериментов, выполненных с другими газами: водородом, гелием и ксеноном.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2018

Didyk A. Yu. et al.

P15-2018-3

Synthesis of Solid-State Structures and Chemical Elements under Irradiation by Bremsstrahlung γ Rays with a Maximum Energy of 10 MeV in Condensed Deuterium at a Pressure of 2.2 kbar

A high-pressure chamber filled with deuterium (DHPC) under initial pressure 2.2 kbar was irradiated during 49 h by bremsstrahlung γ rays with a maximum energy of 10 MeV. After irradiation, several particles with dimensions up to 1 mm fell out of the DHPC. On the inner surfaces of the DHPC, newly formed solid micro-objects were found in the form of crystalline and amorphous microparticles, filaments, nodules and inclusions. Investigations of the elemental composition of the revealed structures, carried out with the help of X-ray microprobe analysis, showed the presence of chemical elements in them, which were absent in the reaction chamber prior to the onset of irradiation. The following chemical elements were registered: ${}^6\text{C}$, ${}^7\text{N}$, ${}^8\text{O}$, ${}^{11}\text{Na}$, ${}^{12}\text{Mg}$, ${}^{13}\text{Al}$, ${}^{14}\text{Si}$, ${}^{15}\text{P}$, ${}^{16}\text{S}$, ${}^{17}\text{Cl}$, ${}^{19}\text{K}$, ${}^{20}\text{Ca}$, ${}^{21}\text{Sc}$, ${}^{22}\text{Ti}$, ${}^{24}\text{Cr}$, ${}^{25}\text{Mn}$, ${}^{26}\text{Fe}$, ${}^{28}\text{Ni}$, ${}^{30}\text{Zn}$, ${}^{33}\text{As}$, as well as ${}^{50}\text{Sn}$ and ${}^{82}\text{Pb}$. The experiment on the synthesis of chemical elements in deuterium confirms the results of previous experiments performed with other gases: hydrogen, helium and xenon.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2018

ВВЕДЕНИЕ

Первый эксперимент по синтезу новых структур и химических элементов под действием γ -квантов был проведен А. Ю. Дидыком и Р. Вишневым с образцом палладия в виде стержня при давлении дейтерия ~ 3 кбар [1–5]. Облучение проводилось в течение ~ 6 ч на микротроне МТ-25 [6] Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ с энергией электронов 9,3 МэВ при среднем токе электронов $\sim 4,4 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$. В результате облучения в реакционной камере были обнаружены необычные твердотельные структуры и «посторонние» химические элементы, отсутствующие в реакционной камере до начала эксперимента. Были зарегистрированы такие элементы, как: Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Fe, Ga, Ru, Rh. Затем были проведены подобные исследования с образцами других металлов и сплавов: Al, V, Cu, Sn, Re, Y Mn_2 , в виде стержней и проволок. Образцы находились в атмосфере газообразного дейтерия при высоком давлении сотен, тысяч бар и облучались тормозным γ -излучением с $E_{\text{max}} = 10$ МэВ и $E_{\text{max}} = 23$ МэВ [7–11]. При таких давлениях плотность атомов газов сравнима с плотностью атомов в твердом теле и жидкостях. Поэтому далее употребляется термин конденсированный газ. Положительные результаты по синтезу новых структур и «посторонних» элементов в атмосфере дейтерия привели к проведению аналогичных исследований с конденсированным водородом с палладиевым [12, 13] и оловянным [14–16] стержнями внутри и с конденсированным гелием с палладиевым стержнем [17, 18]. Такие же исследования были выполнены в камерах с конденсированными чистыми газами: водородом [19–21], гелием [22–25] и ксеноном [26–30] при облучении их тормозными γ -квантами с $E_{\text{max}} = 10$ МэВ. Обзор экспериментов в газах H_2 , D_2 и He представлен в [31–32]. В этой статье мы приводим основные результаты эксперимента по синтезу новых структур и «посторонних» элементов в конденсированном дейтерии с давлением 2,2 кбар под действием тормозного излучения с $E_{\text{max}} = 10$ МэВ.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 1 изображена дейтериевая камера высокого давления (ДНРС). На момент начала облучения γ -квантами давление в камере было 2,2 кбар. Наполнение дейтерием камеры высокого давления ДНРС осуществлялось

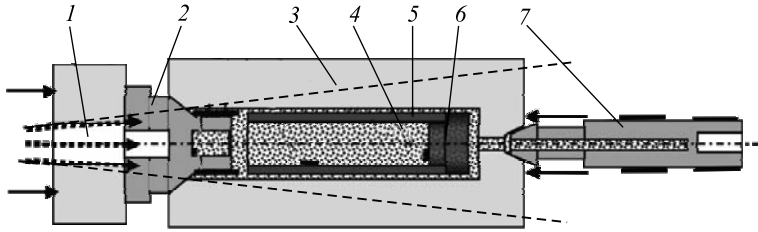


Рис. 1. Камера высокого давления

с предварительным трехкратным повторением операции: заполнением камеры дейтерием до давления 150 бар, сбросом давления до атмосферного и опять заполнением дейтерием до 150 кбар. Степень очистки от атмосферных газов составляет примерно $(1/150)^3 \approx 3 \cdot 10^{-7}$. Корпус камеры (3, рис. 1) и входное, уплотняющее металл по металлу, окно (2) были изготовлены из бериллиевой бронзы $\text{Cu}_{0,98}\text{Be}_{0,02}$. В корпус камеры вставлялись вкладыш (5) и сборник (6), изготовленные из чистой меди — 99,99%. Внутренние размеры камеры, заполненной дейтерием (4): длина — 15 мм, диаметр — 8 мм, объем — $0,75 \text{ см}^3$. Давление дейтерия после заполнения им ДНРС перед началом облучения контролировалось с помощью тензодатчика (7) в течение более двух недель. За это время давление в камере не изменилось. При давлении дейтерия 2,2 кбар его атомная плотность $N_{D_2} \sim 10^{22} \text{ атом. D} \cdot \text{см}^{-3}$, а массовая плотность $\rho_{D_2} \sim 67 \text{ мг} \cdot \text{см}^{-3}$ [33].

Облучение ДНРС проводилось на ускорителе электронов МТ-25 Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флорова по 7–8 ч в день в течение $1,76 \cdot 10^5 \text{ с}$ (49 ч). Энергия электронного пучка была 10 МэВ. Ток электронов на вольфрамовом конвекторе-диске диаметром 40 мм и толщиной 2,5 мм, преобразующем поток электронов в γ -кванты (1, рис. 1), составлял $(1,2\text{--}1,3) \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$. Диаметр пучка электронов — 6–7 мм. Расходимость пучка γ -квантов на полувысоте интенсивности составляла по горизонтали $10^\circ \pm 1^\circ$ и $8^\circ \pm 1^\circ$ по вертикали. За конвектором вплотную располагался поглотитель электронов толщиной 25 мм, изготовленный из дюралюминия Д16Т. Интегральный поток электронов на тормозную мишень за полное время облучения был $\Phi \approx 2,5 \cdot 10^{19}$ электронов. После завершения облучения давление в камере ДНРС измерялось в течение одного месяца. Утечки газа не было.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РЭМ- И РМЗА-АНАЛИЗА

2.1. Аномалии на входном окне. После облучения дейтерий выпускался из ДНРС в окружающую среду и камера вскрывалась. При вскрытии ДНРС в устройстве для напуска газа и измерения его давления (рис. 1, 7) за уплот-

нением металл по металлу были обнаружены капли, похожие на жидкие углеводороды, и несколько видимых частиц с размерами до 1 мм. Растровый электронно-микроскопический анализ (РЭМ) и рентгеновский микрозондовый анализ (РМЗА) с измерением спектров характеристического рентгеновского излучения (СХРИ) проводились в аналитическом центре «Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий» ФБГУП. На рис. 2 приведена одна из структур в виде частиц, обнаруженная на входном окне (а), и типичный рентгеновский спектр СХРИ (б), полученный методом РМЗА. Под фото приведены ширины снимков в микронах. На рис. 3 изображены структуры, обнаруженные на входном окне (ВО), изготовленном из бериллиевой бронзы: а-г — крупные структуры; е — один из наплывов на краю ВО; ж — структуры на поверхности ВО. В табл. 1 приведены полученные методом РМЗА концентрации химических элементов структур, показанных на рис. 2, а и 3.

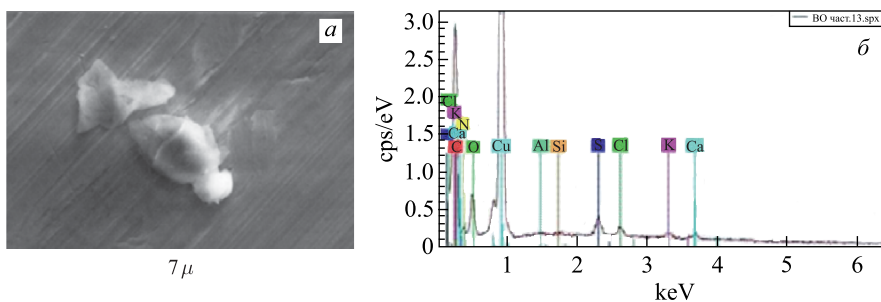


Рис. 2. а) Структура в виде частиц; б) рентгеновский спектр СХРИ

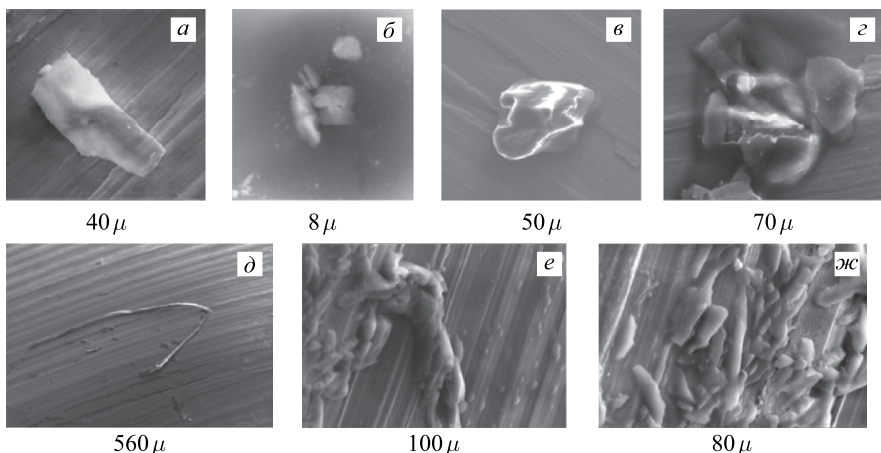


Рис. 3. РЭМ-изображения различных структур на поверхности входного окна

Таблица 1. Концентрации химических элементов структур на входном окне, ат. %

Элемент	Z	Объект (см. рис.)							
		2, а	3, а	3, б	3, в	3, г	3, д	3, е	3, ж
Углерод	6	63,05	70,86	60,41	12,06	64,3 ± 4,7	65,64	67,87	64,48
Азот	7	8,91	—	—	—	—	—	—	—
Кислород	8	15,36	7,82	29,15	69,06	28,7 ± 2,3	20,84	28,63	27,31
Натрий	11	—	—	—	0,74	2,3 ± 0,1	—	—	—
Магний	12	—	—	0,19	8,87	0,15 ± 0,03	—	—	1,19
Алюминий	13	0,06	0,47	0,13	—	0,14 ± 0,03	0,24	0,19	0,15
Кремний	14	0,05	0,16	0,06	—	0,08 ± 0,02	0,07	0,11	0,83
Фосфор	15	—	—	—	—	0,03 ± 0,01	—	—	—
Сера	16	0,54	0,25	1,84	—	0,15 ± 0,01	0,08	0,13	0,07
Хлор	17	0,27	0,13	—	—	0,32 ± 0,02	1,31	0,09	0,08
Калий	19	0,17	—	—	0,11	0,63 ± 0,02	0,46	0,09	0,09
Кальций	20	0,17	0,28	2,09	8,58	0,29 ± 0,02	0,81	0,12	0,09
Скандий	21	—	—	—	—	—	0,06	—	—
Железо	26	—	—	—	0,08	0,15 ± 0,01	0,07	0,08	—
Никель	28	—	—	—	—	—	0,15	0,26	—
Медь	29	11,42	20,02	6,13	0,49	2,76 ± 0,05	9,94	2,42	5,72
Цинк	30	—	—	—	—	—	0,32	—	—

2.2. Аномалии на поверхности вкладыша. На рис. 4, а изображен участок внутренней поверхности вкладыша (рис. 1, 8), разрезанного пополам, с темными пятнами на гладком участке. На рис. 4, б–и представлены РЭМ-изображения различных структур, обнаруженных на его поверхности: б — линейная структура с шарами на поверхности; в — структура волосяного типа; г — кристаллическая структура; д — структура в виде широкой полосы с наростами; е — структура в виде нити толщиной ~ 13 мкм с наростами размером ~ 40 мкм; ж — частица сложной формы; з, и — участки резьбы с крабовидными структурами. В табл. 2 приведены концентрации химических элементов структур, обнаруженных на вкладыше и изображенные на рис. 4.

2.3. Аномалии на поверхности сборника. На рис. 5 представлен внешний вид торца сборника (а) и край торца с двумя протяженными объектами в виде нитей (б). На рис. 6, а–и даны РЭМ-изображения различных структур, обнаруженные на поверхности сборника: а — две крупные частицы в виде полос, лежащих одна на другой; б — частица на поверхности сборника; в — комплекс частиц; г — крупная структура в виде стержня длиной ~ 280 мкм и диаметром 25 мкм и более мелкие частицы; д — крупная частица длиной 100 мкм и шириной до 90 мкм; е — крупная частица длиной 75 и шириной до 43 мкм; ж — структура, плотно прилегающая к сборнику, длиной 107 мкм и шириной до 77 мкм; з — «расплавленная пленка» на поверхности сборника;

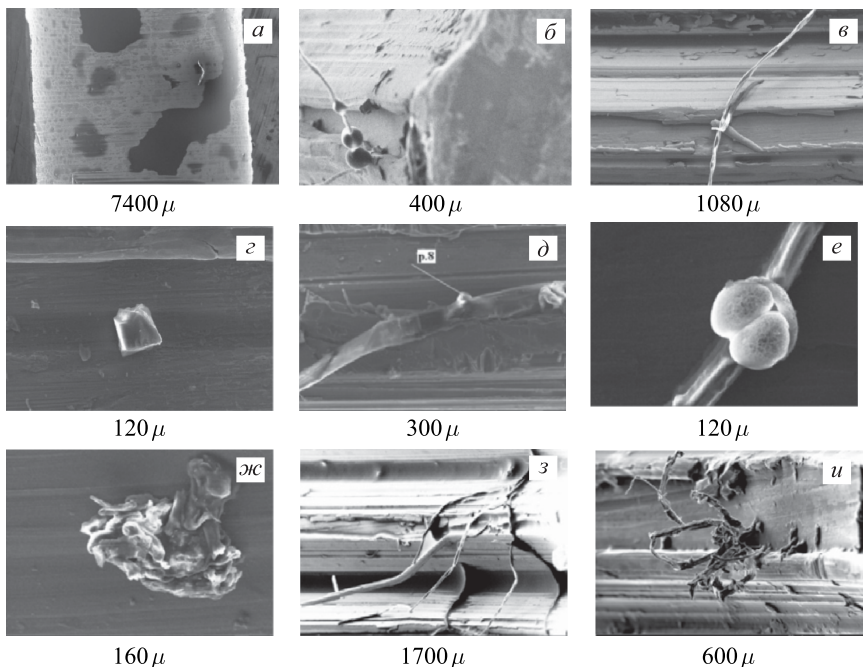


Рис. 4. РЭМ-изображения различных структур на поверхности вкладыша

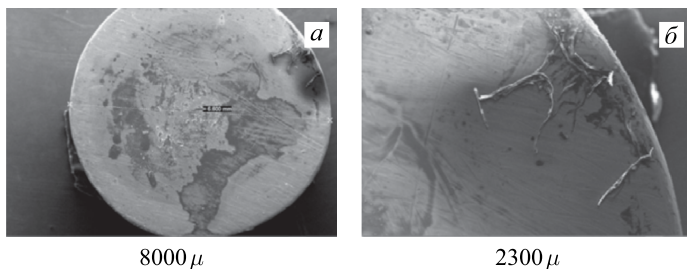


Рис. 5. РЭМ-изображение торца сборника (*a*) и края торца с двумя протяженными объектами (*б*)

и — протяженная структура на поверхности сборника. В табл. 3 приведены полученные методом РМЗА концентрации химических элементов структур, показанных на рис. 6.

2.4. Элементный состав синтезированных частиц. При вскрытии ДНРС в камере (рис. 1), слева и справа от сборника (*б*) было обнаружено несколько микрочастиц. На рис. 7 представлены РЭМ-изображения частиц, найденных за и перед сборником: *a* — частица, состоящая из скрученных полосок; *б* —

Таблица 2. Концентрации химических элементов структур на вкладыше, ат. %

Элемент	Z	Объект (см. рис.)									
		4, а	4, а	4, б	4, в	4, з	4, д	4, е	4, ж	4, з	4, и
Углерод	6	54,92	65,94	68,60	65,17	26,32	37,61	67,33	60,4 ± 8,2	62,05	61,58
Кислород	8	18,36	33,20	30,85	32,48	55,36	18,64	29,30	31,8 ± 4,4	27,15	36,03
Магний	12	—	—	0,19	—	—	—	0,03	—	—	—
Алюминий	13	—	—	—	—	—	0,90	0,02	0,28 ± 0,03	—	—
Кремний	14	0,17	—	0,03	—	17,66	4,27	0,03	0,06 ± 0,02	—	0,03
Фосфор	15	—	—	—	—	—	3,96	0,11	0,03 ± 0,01	—	—
Сера	16	—	—	—	—	—	2,02	0,12	0,14 ± 0,02	—	—
Хлор	17	—	—	0,04	—	—	0,87	—	0,04 ± 0,02	—	—
Калий	19	—	—	0,05	0,12	—	1,63	0,14	0,04 ± 0,01	—	0,03
Кальций	20	—	—	—	—	—	3,87	—	0,16 ± 0,02	—	0,02
Железо	26	—	—	0,07	0,03	—	2,18	—	0,09 ± 0,01	—	0,05
Медь	29	26,54	0,86	0,17	2,19	0,67	24,05	2,94	4,69 ± 0,15	7,21	2,26
Цинк	30	—	—	—	—	—	—	—	2,33 ± 0,08	3,58	—

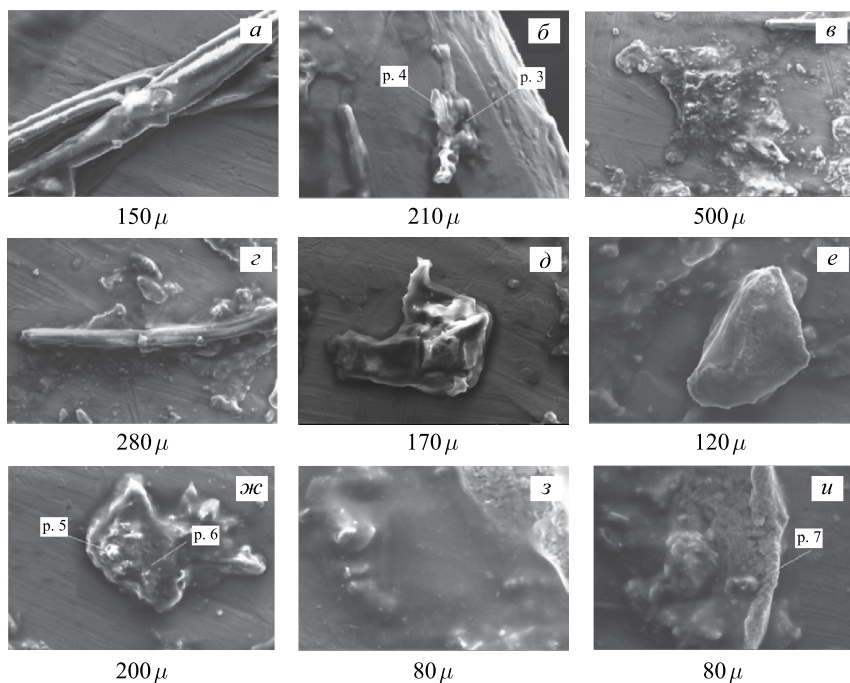


Рис. 6. РЭМ-изображения различных структур на поверхности сборника

Таблица 3. Концентрации химических элементов структур на сборнике, ат. %

Элемент	Z	Объект (см. рис.)											
		6, a	6, б	6, в	6, г	6, д	6, e	6, ж	6, з	6, и	6, и	6, и	
Углерод	6	69,17	85,79	67,93	72,05	73,49	72,82	69,30	69,2 ± 10,8	76,83	70,15	50,25	44,37
Кислород	8	29,78	6,07	7,01	23,64	24,79	25,63	15,47	26,9 ± 4,7	21,02	14,17	24,26	20,03
Натрий	11	—	—	—	—	0,11	—	—	0,25 ± 0,04	0,05	—	—	—
Алюминий	13	—	0,55	0,21	0,05	0,02	0,03	0,02	0,05 ± 0,02	0,06	0,14	0,45	0,45
Кремний	14	—	0,12	0,08	0,04	—	0,04	0,71	—	—	—	—	—
Фосфор	15	—	0,05	0,02	—	0,02	—	0,24	0,71 ± 0,05	0,01	0,52	0,11	—
Сера	16	0,07	0,69	0,16	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Хлор	17	0,03	0,10	—	—	0,03	—	—	—	—	—	—	—
Калий	19	0,03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Кальций	20	0,07	0,32	0,06	2,66	1,15	0,75	0,69	0,81 ± 0,04	1,08	0,72	1,05	—
Скандий	21	—	0,39	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Хром	24	—	—	—	—	—	—	0,12	—	—	—	—	—
Марганец	25	—	—	—	—	—	—	0,12	—	—	—	—	—
Железо	26	—	0,24	—	0,34	0,08	0,06	12,32	0,21 ± 0,02	0,08	0,07	—	—
Медь	29	0,85	5,68	16,95	0,51	0,26	0,31	0,72	0,63 ± 0,03	0,33	13,33	2,70	3,94
Цинк	30	—	—	7,58	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Мышьяк	33	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,82
Олово	50	—	—	—	0,43	0,05	0,27	0,19	1,03 ± 0,04	0,40	0,15	18,08	27,98
Свинец	82	—	—	—	0,28	0,01	0,09	0,10	0,25 ± 0,02	0,14	0,76	3,10	2,42

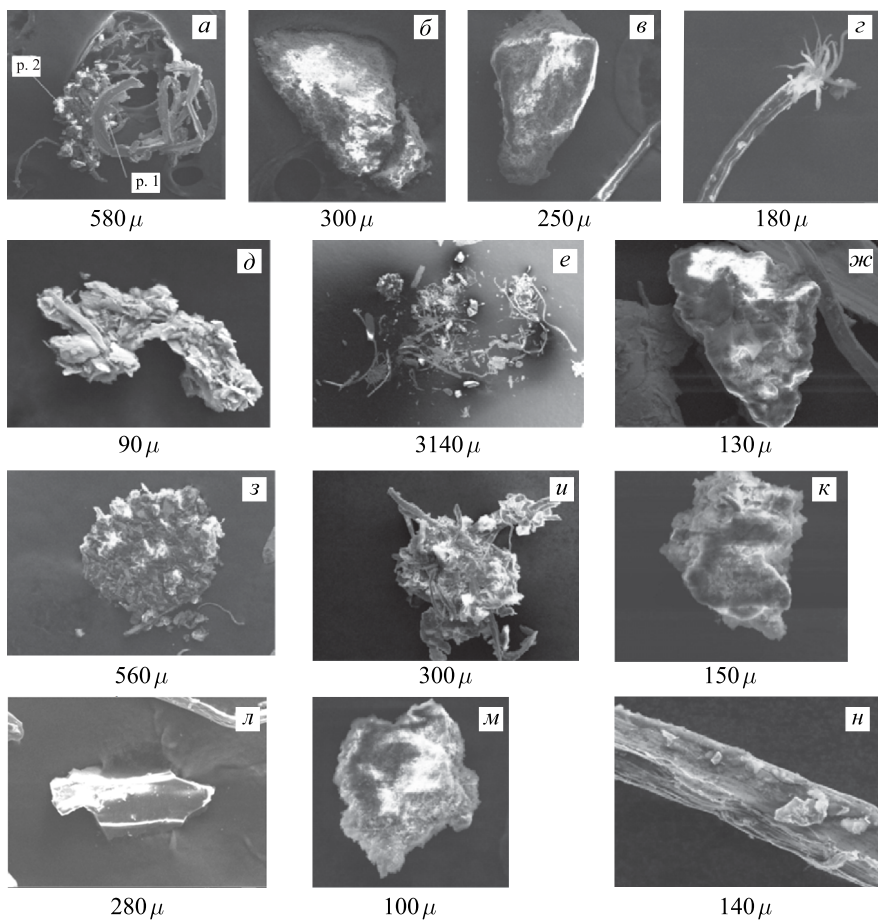


Рис. 7. РЭМ-изображения различных частиц

две частицы, одна из которых имеет длину ~ 270 мкм и ширину ~ 186 мкм; *в* — частица; *г* — частица в виде тонкого «волоса», найденная за сборником; *д* — пятая частица, состоящая из скрученных полосок; *е* — комплекс частиц сложной формы длиной около 90 мкм и шириной 48 мкм, состоящий из отдельных спрессованных частичек; *ж* — шестая частица из рис. 7, *е* длиной 100 мкм и шириной 64 мкм; *з* — седьмая частица из рис. 7, *е* диаметром ~ 330 мкм; *и* — восьмая частица из рис. 7, *е* длиной ~ 220 мкм; *к* — девятая частица с длиной 131 мкм и шириной 103 мкм; *л* — десятая частица с длиной 188 мкм и шириной 59 мкм; *м* — одиннадцатая частица с длиной 100 мкм и шириной 84 мкм; *н* — часть «волоска» длиной 158 мкм. «Волосок» — длина

Таблица 4. Концентрации химических элементов частиц, ат. %

Элемент	Z	Объект (см. рис.)													
		7,а	7,а	7,б	7,в	7,г	8,г	7,д	7,ж	7,з	7,и	7,л	7,м	7,н	
Углерод	6	24,70	66,17	17,15	15,08	53,37	47,05	14,33	66,95	62,6 ± 9,1	28,23	11,86	47,20		
Азот	7	—	—	—	—	17,92	8,78	—	—	—	—	—	—	—	
Кислород	8	4,58	12,72	66,42	64,59	27,51	—	62,52	24,66	17,1 ± 2,7	56,96	58,93	12,50		
Натрий	11	—	—	0,49	0,49	0,06	—	1,23	—	—	0,08	—	—	—	
Магний	12	—	—	—	—	—	—	—	—	0,28 ± 0,05	0,02	2,54	—	—	
Алюминий	13	—	—	4,68	0,44	—	—	7,87	0,07	0,20 ± 0,03	0,07	0,67	—	—	
Кремний	14	—	—	0,18	0,50	—	0,28	0,66	0,03	0,03 ± 0,02	14,45	16,95	—	—	
Фосфор	15	—	—	0,83	16,51	—	—	1,25	0,02	0,08 ± 0,02	—	—	—	—	
Сера	16	—	—	0,09	0,05	1,10	—	0,09	0,06	0,03 ± 0,01	—	0,08	—	—	
Хлор	17	—	—	0,26	0,15	0,04	—	0,17	0,03	0,02 ± 0,02	—	—	—	—	
Калий	19	—	—	0,17	0,19	—	—	0,16	—	—	—	—	—	—	
Кальций	20	—	—	9,60	1,84	—	—	10,90	0,82	0,19 ± 0,02	0,09	8,69	—	—	
Марганец	25	—	—	—	—	—	0,13	—	—	—	—	—	—	—	
Железо	26	—	—	0,11	0,15	—	17,25	0,21	0,12	0,17 ± 0,02	—	0,23	—	—	
Мель	29	46,24	13,76	—	—	—	16,71	0,41	4,56	12,4 ± 0,4	0,09	0,07	25,84	—	
Цинк	30	24,48	7,35	—	—	—	9,81	0,20	2,68	6,95 ± 0,22	—	—	14,46	—	

~ 3,9 мм и толщина 36–40 мкм. В табл. 4 приведены полученные методом РМЗА концентрации химических элементов частиц, показанных на рис. 7. Состав девятой частицы на рис. 7, *к* очень похож на состав шестой частицы на рис. 7, *ж*. В девятой частице много кислорода, магния, кремния и кальция. Присутствует также титан ${}_{22}\text{Ti}$.

ОБСУЖДЕНИЕ

Рентгеновский микрозондовый анализ проводился в режиме в «точке», когда площадь возбуждения исследуемого объекта пучком электронов составляла ~ 1–4 мкм², а глубина возбуждения ~ 1–2 мкм. Отметим несколько важных моментов в наших РЭМ- и РМЗА-исследованиях:

— программа обработки спектров, полученных с помощью РМЗА, отбирает только линии тех элементов, которые превышают не менее чем в три раза ошибку измерения;

— программа сама рассчитывает концентрации элементов в весовых и атомных процентах при наличии в спектре главных характеристических рентгеновских линий данных элементов;

— приведенные концентрации «посторонних» элементов в объектах имеют не количественный, а качественный характер. Выбор объектов для измерений носил исключительно субъективный характер. Как правило, обмерялись наиболее привлекательные, яркие, светлые объекты с наличием элементов с большими атомными номерами;

— для достоверной обработки спектров требуется набор значительной статистики, который в наших измерениях не всегда производился;

— в качестве объектов для измерений, как правило, выбирались микрочастицы и структуры, расположенные на поверхности входного окна, вкладыша и сборника;

— размеры изучаемых объектов значительно больше, чем область возбуждения и эмиссии характеристического рентгеновского излучения. Поэтому сделанные измерения могут не соответствовать концентрации элементов во всем объеме обмеряемых объектов;

— при измерении объектов в «точке» локальная концентрация вновь образовавшихся элементов могла составлять несколько десятков процентов. Кроме того, такие измерения имеют ограничения, связанные с пространственным разрешением применяемого оборудования.

В столбцах 3, *г* табл. 1; 4, *ж* табл. 2; 6, *ж* табл. 3 и 7, *и* табл. 4 приведены аппаратные ошибки измерений. В зависимости от интенсивности линии в спектре рентгеновского излучения относительные ошибки меняются от 3 до 50%. В столбцах 6, *б*–6, *б*; 6, *ж*–6, *ж*; 6, *з*–6, *з* табл. 3 и 7, *а*–7, *а* табл. 4 представлены измерения, сделанные для одного и того же объекта, но в двух разных точках. Из сравнения видно, что соотношение химических элементов

в разных точках может измениться в несколько раз. В некоторых случаях химические элементы, обнаруженные в одной точке, не были зарегистрированы в другой.

Тривиальным объяснением появления всех зарегистрированных в экспериментах «посторонних» химических элементов является неконтролируемый их занос во внутренний объем реакционной камеры в процессе заполнения камеры дейтерием. Для проверки этого предположения были проведены специальные, «фоновые» эксперименты. После одной из процедур заполнения дейтерием ДНРС камера была вскрыта без облучения. В другом опыте в камере находился образец Pd, который выдерживался в ДНРС в течение 10^5 с без облучения при давлении дейтерия ~ 20 кбар. В следующем эксперименте камера была заполнена дейтерием до давления 60 бар с палладиевым цилиндром Pd ($\varnothing 0,5 \times 0,8$ мм) внутри. Палладий был чистотой 99,997%. Этот эксперимент был нацелен на получение химических элементов при давлении дейтерия, пониженном по сравнению с другими экспериментами, в которых давление дейтерия составляло 1,2 и 3 кбар [1, 2]. Облучение проводилось при энергии электронов 10 МэВ, при среднем токе электронного пучка $\sim 1,1 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$. Время облучения составило $1,3 \cdot 10^5$ с. С такими же параметрами были проведены облучение образца Pd на воздухе и облучение пустой НРС при вакууме 10^{-4} Па. Во всех случаях РЭМ- и РМЗА-исследования внутренних поверхностей вкладышей, сборников и поверхностей палладиевых образцов показали отсутствие в них каких-либо новых синтезированных структур и измененного элементного состава.

Следовательно, появление твердотельных структур и «посторонних» химических элементов на внутренних поверхностях камеры ДНРС, с высокой степенью вероятности, определяется неядерным взаимодействием γ -излучения как с конденсированным дейтерием, так и с атомами, находящимися в поверхностном слое конструкционных материалов в присутствии конденсированного дейтерия.

На рис. 8 для входного окна представлены усредненные концентрации химических элементов восьми структур по измерениям, приведенным в табл. 1.

На рис. 9 для втулки даны усредненные концентрации химических элементов по десяти измерениям, приведенным в табл. 2.

На рис. 10 для сборника представлены усредненные концентрации химических элементов девяти структур по 12 измерениям, приведенным в табл. 3.

На рис. 11 для 11 частиц даны усредненные концентрации химических элементов по 12 измерениям, приведенным в табл. 4.

Принимая во внимание всю совокупность данных, полученных методом РМЗА, можно утверждать, что в эксперименте по облучению γ -квантами конденсированного дейтерия не наблюдается существенного различия в распределениях химических элементов для входного окна, вкладыша, сборника и частиц.

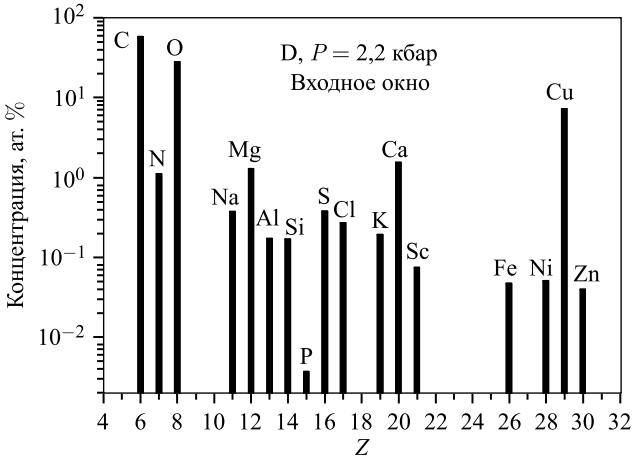


Рис. 8. Усредненные концентрации химических элементов по восьми измерениям входного окна

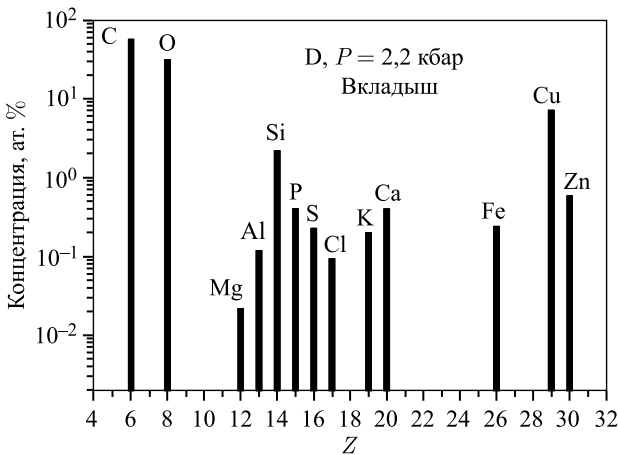


Рис. 9. Усредненные концентрации химических элементов по 10 измерениям вкладыша

Характерной особенностью для всех полученных распределений является постоянное присутствие группы легких элементов с $Z \leq 30$, от углерода до цинка. Элементы до углерода не регистрируются методом рентгеновского микрозондового анализа.

Обращает на себя внимание факт, что во многих структурах, обнаруженных на поверхности сборника (табл. 3), зарегистрированы химические элементы: ${}_{33}\text{As}$, ${}_{50}\text{Sn}$, ${}_{82}\text{Pb}$. Как известно, ядра ${}_{50}\text{Sn}$ и ${}_{82}\text{Pb}$ имеют замкнутые

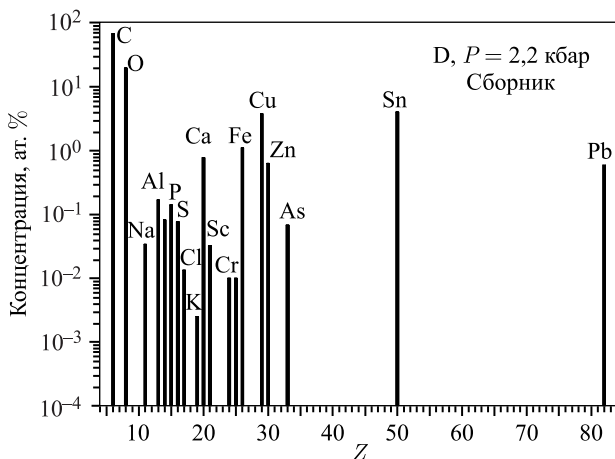


Рис. 10. Усредненные концентрации химических элементов по 12 измерениям сборника

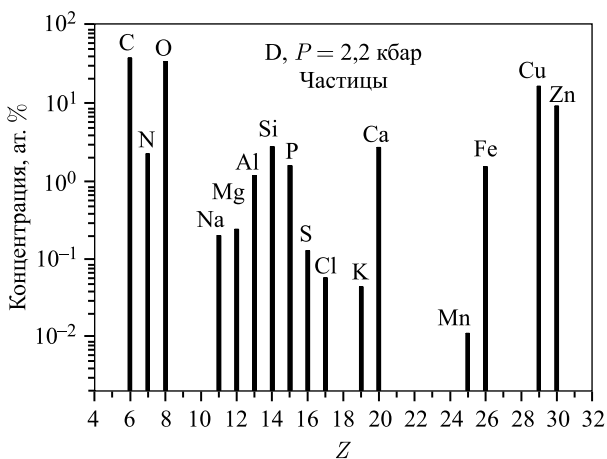


Рис. 11. Усредненные концентрации химических элементов по 12 измерениям частиц

оболочки по протонам ($Z = 50$ и $Z = 82$), а свинец имеет замкнутую оболочку по нейтронам ($N = 126$). Отметим, что сборник наиболее подвержен воздействию комптоновских электронов, образующихся в реакции тормозного излучения с атомными электронами дейтерия.

Методом рентгеновского микрозондового анализа на поверхностях, имевших контакт с дейтерием, и в обнаруженных микрочастицах и структурах зарегистрированы следующие отсутствовавшие ранее в реакционной камере химические элементы: ${}^6\text{C}$, ${}^7\text{N}$, ${}^8\text{O}$, ${}^{11}\text{Na}$, ${}^{12}\text{Mg}$, ${}^{13}\text{Al}$, ${}^{14}\text{Si}$, ${}^{15}\text{P}$, ${}^{16}\text{S}$, ${}^{17}\text{Cl}$, ${}^{19}\text{K}$,

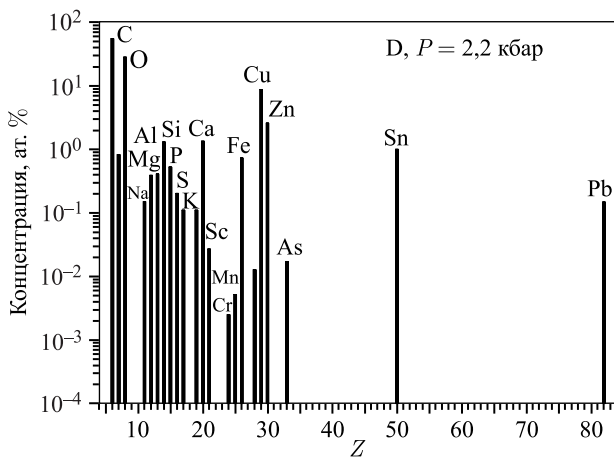


Рис. 12. Усредненные концентрации химических элементов по 42 измерениям

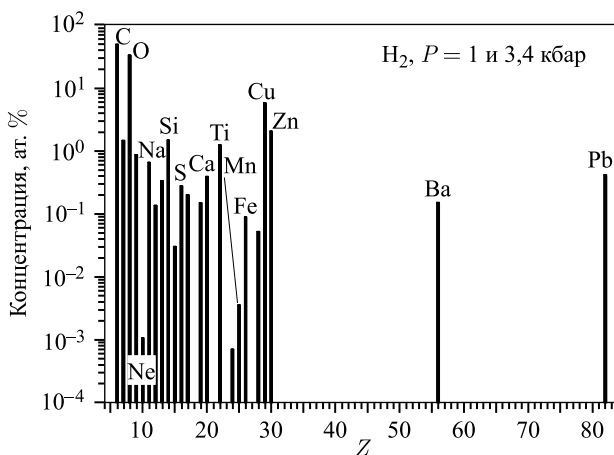


Рис. 13. Концентрации химических элементов, усредненные по 35 измерениям в экспериментах с H_2

^{20}Ca , ^{22}Ti , ^{23}Sc , ^{24}Cr , ^{25}Mn , ^{26}Fe , ^{28}Ni , ^{30}Zn , ^{33}As , ^{50}Sn , ^{82}Pb . На рис. 12 представлены усредненные концентрации химических элементов по всем 42 измерениям, приведенным в табл. 1–4.

На рис. 13 приводятся усредненные концентрации химических элементов, зарегистрированных в двух экспериментах с водородом при $P = 1$ и $3,4$ кбар по 35 измерениям.

На рис. 14 приводятся усредненные концентрации химических элементов, зарегистрированных в двух экспериментах с гелием при $P = 1,1$ и $3,05$ кбар по 28 измерениям.

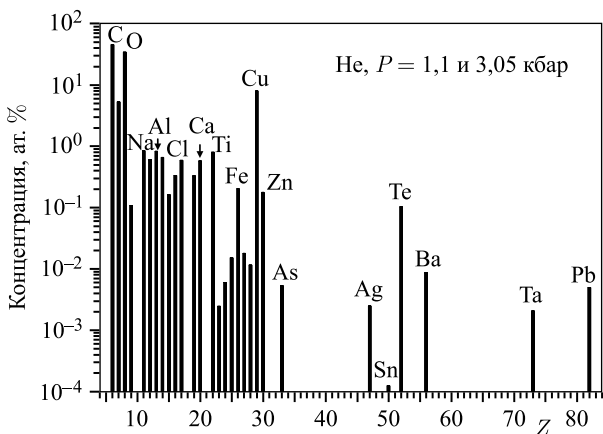


Рис. 14. Концентрации химических элементов, усредненные по 28 измерениям в экспериментах с He

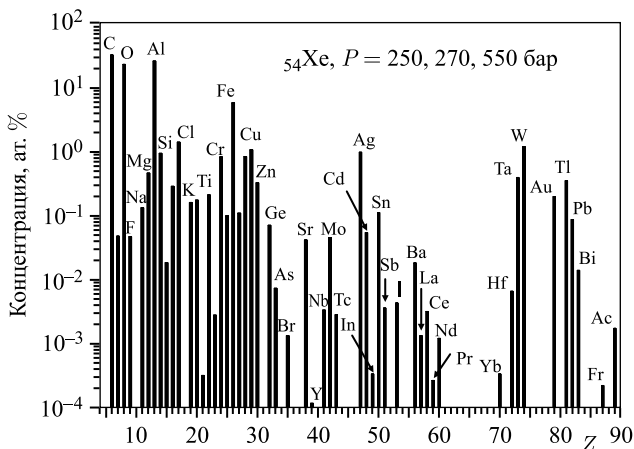


Рис. 15. Концентрации химических элементов, усредненные по 282 измерениям в экспериментах с Xe

На рис. 15 представлены концентрации химических элементов, усредненные по трем экспериментам с ксеноном с $P = 250, 270$ и 550 бар. В этом распределении использовались результаты 282 измерений.

При сравнении рисунков становится очевидным, что во всех распределениях постоянно присутствует группа легких элементов с $Z \leq 30$, от углерода до цинка. Кроме того, с увеличением заряда и массы облучаемого газа возрастает количество синтезированных элементов с $Z > 30$. Так, при облучении ксенона в нем синтезируются «практически все» химические элементы таблицы Менделеева (рис. 15).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенный эксперимент с облучением тормозными γ -квантами конденсированного дейтерия подтверждает результаты по синтезу химических элементов предыдущих экспериментов, выполненных с другими конденсированными газами: водородом, гелием и ксеноном [19–32]. В этих экспериментах также были обнаружены твердотельные структуры, содержащие химические элементы, отсутствующие в объеме реакционной камеры до начала облучения. Диапазон химических элементов, синтезируемых в этих экспериментах, простирается от углерода до висмута.

При сравнении распределений по выходу химических элементов в реакциях γ -излучения с конденсированными газами была получена новая информация, стало очевидным, что

- во всех экспериментах появляются легкие элементы с $6 \leq Z \leq 30$, от углерода до цинка, а также свинец,
- с увеличением заряда и массы облучаемого газа возрастает число химических элементов с $Z > 30$. Так, при облучении ксенона в нем синтезируются «практически все» химические элементы таблицы Менделеева, а также зарегистрированы радиоактивные элементы: технеций, франций, актиний [28–29].

Из сопоставления проведенных и «фоновых» экспериментов делается предположение, что появление твердотельных структур и «посторонних» химических элементов может определяться неядерным взаимодействием γ -излучения как с конденсированным дейтерием, так и с атомами, находящимися в поверхностном слое конструкционных материалов в присутствии конденсированного дейтерия.

ЛИТЕРАТУРА

1. *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.
2. *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.
3. *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.
4. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* Синтез новых структур в плотном газообразном дейтерии и насыщенном дейтерием палладии при ядерных реакциях, инициированных γ -квантами // *Физика и химия обработки материалов.* 2012. № 5. С. 5–13; Препринт ОИЯИ Р15-2012-50. Дубна, 2012. 16 с.

5. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R., Wilczynska-Kitowska T., Shilov V.M.* Changes in the Chemical Composition of Nuclear Reaction Products Irradiated with 10 MeV γ Quanta in Deuterium Saturated Palladium // *J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* 2014. V. 8, No. 6. P. 1100–1112.
6. *Белов А. Г.* Микротрон МТ-25 // Рабочее совещ. по использованию микротронов в ядерной физике, Пловдив, 22–24 сентября 1992 г. Дубна, 1993. С. 12–19.
7. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П.* Ядерные реакции в насыщенном дейтерием палладию 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.
8. *Didyk A. Yu., Wiśniewski 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, No. 4. P. 209–217.
9. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П.* Изменения поверхности, объемных свойств образцов ванадия и нержавеющей стали, облученных в плотном газообразном дейтерии γ -квантами с пороговой энергией 23 МэВ. Препринт ОИЯИ P15-2012-75. Дубна, 2012. 15 с.
10. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П.* Результаты по облучению алюминия и гомогенного сплава YMn_2 γ -квантами с энергией 23 МэВ в атмосфере молекулярного дейтерия при давлении 2 кбар // *Письма в ЭЧАЯ.* 2014. Т. 11, №2(186). С. 278–292.
11. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П.* Результаты по облучению нержавеющей стали и меди γ -квантами с энергией 23 МэВ в атмосфере молекулярного дейтерия при давлении 2 кбар // *Письма в ЭЧАЯ.* 2014. Т. 11, №3(187). С. 491–512.
12. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* 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 P15-2013-80. Дубна, 2013. 32 с.
13. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Synthesis of New Structures on the Surface of Pd Rod and HNPC Elements and Their Chemical Composition in Nuclear Reactions Induced by Bremstrahlung γ Quanta with Threshold Energy of 10 MeV in Molecular Hydrogen at a Pressure of 0.5 kbar // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2015. V. 12, No. 4. P. 603–617; Препринт ОИЯИ P15-2014-6. Дубна, 2014. 34 с.
14. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П.* 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. Препринт ОИЯИ P15-2014-89. Дубна, 2014. 26 с.
15. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П.* Ядерные реакции с синтезом микрочастиц в HNPC при давлении 3,5 кбар водорода с цилиндром из олова под действием облучения

- тормозными γ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ. Препринт ОИЯИ P15-2014-88. Дубна, 2014. 43 с.
16. Дидык А. Ю., Вишневецкий Р., Вилчиньска-Китовска Т., Исакова Л. Д. Синтез микрочастиц в плотном водороде при давлении 3,5 кбар с оловянным стержнем под действием тормозных γ -квантов с пороговой энергией 10 МэВ. Препринт ОИЯИ P15-2014-104. Дубна, 2014. 23 с.
 17. Дидык А. Ю., Вишневецкий Р., Семин В. А. Синтез микрочастиц в гелии при давлении 2,4 кбар с палладием при облучении тормозными γ -квантами с максимальной энергией 10 МэВ (часть 1). Препринт ОИЯИ P15-2015-33. Дубна, 2015. 40 с.
 18. Дидык А. Ю., Вишневецкий Р., Семин В. А. Исследование процессов образования новых структур и элементов в гелии при давлении 2,4 кбар с палладием при воздействии тормозных γ -квантов с максимальной энергией 10 МэВ (часть 2). Препринт ОИЯИ P15-2015-34. Дубна, 2015. 40 с.
 19. 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 P15-2014-7. Дубна, 2014. 24 с.
 20. Didyk A. Yu., Wiśniewski R. Synthesis of Microobjects in 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.
 21. Didyk A. Yu., Wiśniewski R. Synthesis of Microparticles in 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.
 22. Didyk A. Yu., Wiśniewski R., Wilczynska-Kitowska T. The Carbon-Based Structures Synthesized through Nuclear Reactions in Helium at 1.1 kbar Pressure under Irradiation with Braking γ -Rays of 10 MeV Threshold Energy // Eur. Phys. Lett. 2015. V. 109. P. 22001-P.1–22001-P.6.
 23. 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. 40 с.
 24. 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. 40 с.
 25. 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 P15-2014-87. Дубна, 2014. 23 с.

26. Дидык А. Ю., Гульбекян Г. Г., Мышинский Г. В. РЭМ- и РМЗА-исследования синтезированных частиц и объектов при облучении плотного ксенона (270 атм) тормозными γ -квантами с максимальной энергией 10 МэВ. Препринт ОИЯИ Р15-2015-71. Дубна, 2015. 40 с.
27. Дидык А. Ю., Гульбекян Г. Г., Мышинский Г. В. Исследование изменений элементного состава и структуры поверхностей при облучении плотного ксенона (270 атм) тормозными γ -квантами с максимальной энергией 10 МэВ. Препринт ОИЯИ Р15-2015-72. Дубна, 2015. 32 с.
28. Дидык А. Ю., Гульбекян Г. Г., Мышинский Г. В. Аномалии на внутренних поверхностях камеры высокого давления ксенона ХеНРС (250 бар) с образованием микрочастиц сложного состава при облучении тормозным излучением с пороговой энергией 10 МэВ. Препринт ОИЯИ Р15-2016-1. Дубна, 2016. 38 с.
29. Дидык А. Ю., Гульбекян Г. Г., Мышинский Г. В., Сабельников А. В. Синтез микрочастиц сложного состава в камере высокого давления ксенона (550 бар) при облучении тормозным излучением с максимальной энергией 10 МэВ. Препринт ОИЯИ Р15-2016-19. Дубна, 2016. 49 с.
30. *Didyk A. Yu., Gulbekian G. G., Mishynski G. V., Wiśniewski R.* A Study of Changes of the Element Composition and Structure of Surfaces under Irradiation of Dense Xenon Gas (270 bar) by γ -Rays with Maximum Energy of 10 MeV // JPSA. 2016. V. 6, No. 2. P. 18–28.
31. Дидык А. Ю. Ядерные реакции синтеза и деления химических элементов и образование новых структур в плотных газах H_2 , D_2 и He при облучении 10-МэВ γ -квантами // Физика и химия обработки материалов. 2015. № 2. С. 5–19.
32. *Wiśniewski R., Didyk A. Yu.* Synthesis of New Structures and Substances in Dense Gases H_2 , D_2 and He under Irradiation by Braking 10 MeV γ -Rays in $CuBe_2$ Pressure Chamber // JPSA. 2016. V. 6, No. 4. P. 13–21.
33. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Properties of Hydrogen and Its Isotopes under High Pressure, and Technological Applications. Dubna: JINR, 2013. 320 p.

Получено 7 февраля 2018 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 02.04.2018.

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

Усл. печ. л. 1,37. Уч.-изд. л. 1,65. Тираж 190 экз. Заказ № 59376.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/