

P15-2013-41

А. Ю. Дидык *, Р. Вишневский ^{1, **}

РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ОБЛУЧЕНИЮ АЛЮМИНИЯ
И ГОМОГЕННОГО СПЛАВА γ -КВАНТАМИ
С ЭНЕРГИЕЙ 23 МэВ В АТМОСФЕРЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО
ДЕЙТЕРИЯ ПРИ ДАВЛЕНИИ 2 кбар

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

¹ Национальный центр ядерных исследований, Отвоцк, Польша

* E-mail: didyk@jinr.ru

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

Дидык А. Ю., Вишневский Р.

P15-2013-41

Результаты по облучению алюминия и гомогенного сплава YMn_2
 γ -квантами с энергией 23 МэВ в атмосфере молекулярного дейтерия
при давлении 2 кбар

Образцы ряда металлов были размещены последовательно по длине в камере высокого давления дейтерия «пальчикового типа» (DHPC-FT). Образцы представляли собой два стержня из алюминия, стержень из меди, два слитка из сплава YMn_2 и проволоку из нержавеющей стали. Давление молекулярного дейтерия в камере DHPC-FT составляло 2 кбар. Облучение образцов было проведено тормозными γ -квантами с граничной энергией 23 МэВ. После облучения все образцы были исследованы на сканирующих электронных микроскопах (СЭМ) с рентгеновским микроэлементным зондовым анализом (РМЗА). Обнаружены значительные изменения структуры поверхностей и элементного состава измеренного образца алюминия, полное разрушение образца гомогенного сплава YMn_2 , а также «образование монокристаллических образцов» типа YMn_2 и структур, напоминающих «кристаллы» на основе марганца. Предложено феноменологическое объяснение обнаруженных явлений и эффектов на основе ядерных реакций с учетом некоторых новых подходов.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2013

Didyk A. Yu., Wiśniewski R.

P15-2013-41

Results of Irradiation of Aluminum and Homogeneous Alloy YMn_2
by 23 MeV Energy γ -Quanta in the Atmosphere of Molecular Deuterium
at 2 kbar Pressure

Metal samples were placed in a deuterium high pressure chamber of «finger type» (DHPC-FT) along its length. The samples were two aluminum rods, a copper rod, two pieces of homogeneous alloy YMn_2 and stainless steel wire. The deuterium molecular pressure inside the DHPC-FT was about 2 kbar. Irradiation of the samples was carried out by the braking γ -quanta with the threshold energy 23 MeV. All the samples were studied using a scanning electronic microscope (SEM) with roentgen microelement probe analysis (RMPA). Significant changes in the surface structures and element compositions are observed in all the measured samples of aluminum, as well as full destruction of homogeneous alloy YMn_2 , formation of «single crystals» of YMn_2 and a structure similar to crystals on the base of Mn. A phenomenological description of the observed phenomena and effects based on nuclear reactions with taking into consideration some new approaches are proposed.

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

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

ВВЕДЕНИЕ

В серии предыдущих статей были представлены результаты по изменению химического состава поверхностей компонент, входящих в камеру высокого давления дейтерия (ДНРС) с Pd-стержнем внутри (см. рис. 1 в [1–5]), при давлении дейтерия около 3 кбар с образованием радиационно-синтезированной структуры из относительно легких химических элементов (${}^6\text{C}$, ${}^8\text{O}$, ${}^{13}\text{Al}$, ${}^{14}\text{Si}$, ${}^{22}\text{Ti}$, ${}^{29}\text{Cu}$, ${}^{30}\text{Zn}$), а также и более тяжелых элементов в меньших количествах, таких как ${}^{47}\text{Ag}$, ${}^{73}\text{Ta}$, ${}^{74}\text{W}$, ${}^{78}\text{Pt}$, ${}^{82}\text{Pb}$, образовавшихся в результате ядерных реакций, инициированных γ -квантами с энергией 9 МэВ в насыщенном дейтерием палладиевом стержне. В серии следующих исследований была также использована ДНРС с палладиевым стержнем внутри при давлении дейтерия около 1,2 кбар при облучении γ -квантами с энергией 10 МэВ при большей, чем в два раза, длительности экспозиции [6, 7]. В этом случае оказалось, что вся внутренняя поверхность ДНРС была покрыта преимущественно свинцом, но опять же и с образованием ${}^{47}\text{Ag}$, ${}^{78}\text{Pt}$, ${}^{79}\text{Au}$. В серии следующих исследований с использованием камеры высокого давления дейтерия удлиненного (пальчикового типа) ДНРС-FT при давлении молекулярного дейтерия примерно 2 кбар были изучены следующие составы: палладий и рений [8], нержавеющая сталь и ванадий [9] при облучении γ -квантами с энергией 23 МэВ. Этот диапазон энергий γ -квантов уже соответствует сечениям ${}^A_Z N(\gamma, n) {}^{A-1}_Z N$ реакций, характерных для гигантского дипольного резонанса [10]. Для случая облучения ДНРС с ${}^{46}\text{Pd}$ и ${}^{75}\text{Re}$ внутри был также обнаружен широкий спектр продуктов ядерных реакций с выбросами из поверхностей Pd и Re, напоминающими «застывшие в полете протуберанцы» с образованием на поверхности палладия в районах образовавшихся трещин и разломов привнесенных от находящихся вблизи образцов рения монокристаллов оксида рения. Весьма значительные изменения произошли и в камере ДНРС-FT с находящимися внутри нержавеющей сталью и ванадием, на поверхности которых также обнаружен сильно измененный химический состав. А образовавшиеся трещины и разломы совместно с сильно окисленной поверхностью ванадия позволяют сделать вывод о высокой температуре за счет происходящих ядерных реакций. Полученные в работах [1–9] результаты позволили авторам запатентовать новый способ получения энергии, представленный в патенте [11].

На основе обнаруженных изменений концентраций химических элементов была предложена феноменологическая модель ядерных реакций [12] с

использованием реакции типа реакции Оппенгеймера [13] и им сопутствующих в капельной модели ядра при изменении вращательного момента [19–21].

Данная работа является продолжением экспериментов, начатых в работах [8, 9] с применением ДНРС-FT (deuterium high pressure chamber of finger's type), с целью выяснения зависимостей эффектов в различных материалах от величины давления дейтерия в камере, влияния интенсивности потока γ -квантов и их энергии.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Образцы из Al (99,8 %), Cu (99,9 %), в виде стержней, два необработанных кусочка гомогенного сплава YMn₂ и нержавеющая проволока с параметрами, представленными в табл. 1, были помещены внутрь камеры высокого давления дейтерия удлиненного типа ДНРС-FT, схематически представленной на рис. 1.

Таблица 1. Параметры и расположение образцов в ДНРС-FT при облучении

Номер образца	Материал	Длина, см	Диаметр, см	Масса, г
1	Al, $\rho = 2,69 \text{ г/см}^3$	1,52	0,205	0,1180
2	Слиток, YMn ₂	—	—	0,0452
3	Al, $\rho = 2,69 \text{ г/см}^3$	1,15	0,205	0,0877
4	Слиток, YMn ₂	—	—	0,0229
5	Cu, $\rho = 8,96 \text{ г/см}^3$	0,92	0,205	0,2413
6	Нержавеющая сталь, $\rho = 7,9 \text{ г/см}^3$	5,56	0,05	0,0851

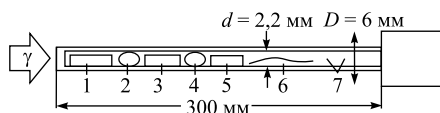


Рис. 1. Схема камеры ДНРС-FT для облучения материалов: 1–6 — номера образцов; 7 — дейтерий

Размещение внутри ДНРС-FT разнородных материалов естественно затрудняет последующий анализ процессов, которые имели место. Но установить общие закономерности и тенденции поведения материалов в плотном молекулярном дейтерии при облучении γ -квантами все же возможно.

Давление молекулярного газообразного дейтерия в ДНРС-FT составляло примерно 2 кбар. Облучение всех образцов было проведено на электронном ускорителе МТ-25 электронами с энергией 23 МэВ при среднем токе

пучка электронов 11–12 мкА в течение 19,5 ч (т. е. полное время облучения составило $7,02 \cdot 10^4$ с).

Толщина W тормозной мишени составляла 3 мм, поглотитель из Al имел толщину 25 мм, следовательно, расстояние от первого образца из Al-проволоки с учетом толщины входного окна ~ 7 мм, состоящего из нержавеющей стали, было равным $L_1 = 35$ мм. Диаметр электронного пучка на вольфрамовой фольге составлял примерно 8 мм, угловая расходимость потока тормозных γ -квантов примерно 8° на 0,7 высоты распределения.

Достоинства и недостатки расположения образцов в ДНРС-FT представлены в работах [8,9], в частности, одним из достоинств можно считать следующее: при расположении образцов вдоль оси камеры можно за одно облучение получить различные плотности потоков γ -квантов и доз облучения. Методика расчета потока γ -квантов в камере ДНРС-FT и в образцах представлена в [1–4].

Необходимо отметить, что в отличие от первого эксперимента, который был детально описан в работах [1–7], а использованная ДНРС-FT камера запатентована в работе [11], в данном эксперименте стенки камеры, созданной по иному проекту, состоят из нержавеющей стали типа ОХ18Н10 с тем, чтобы исключить такие химические элементы, которые присутствовали в первом эксперименте, как медь и цинк.

Обсудим экспериментальные результаты для Al-стержня длиной 1,52 см с диаметром 2,05 мм.

После облучения камера ДНРС-FT имела высокую активацию, в связи с чем сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) и рентгеновский микроэлементный зондовый анализ (РМЗА) образцов были проведены только через четыре месяца после завершения облучения.

На рис. 2 представлено СЭМ-изображение исходного алюминия, а в табл. 2 элементный состав исходного алюминия, где C — концентрация элемента.

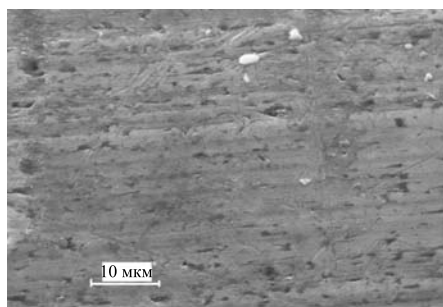


Рис. 2. СЭМ-изображение исходного алюминия

Таблица 2. Элементный состав исходного алюминия

zN	Серия	C , вес. %	C , ат. %
${}_6C$	К	$19,29 \pm 3,23$	34,28
${}_8O$	К	$4,20 \pm 0,78$	5,60
${}_{13}Al$	К	$70,85 \pm 2,76$	56,05
${}_{14}Si$	К	$5,05 \pm 0,22$	3,84
${}_{26}Fe$	К	$0,60 \pm 0,05$	0,23

Как видно, в исходном алюминии ((70,85 ± 2,76) вес. %) присутствует кремний ((5,05 ± 0,22) вес. %), углерод ((19,29 ± 3,23) вес. %) и кислород ((4,20 ± 0,78) вес. %).

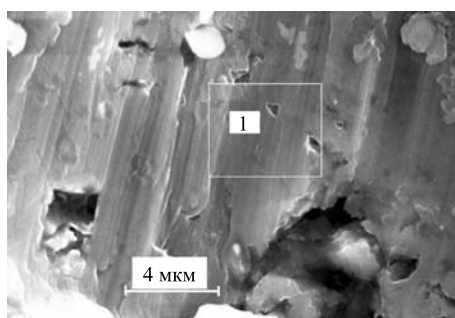


Рис. 3. СЭМ-изображение алюминия после облучения с указанием площади 1, в которой был сделан РМЗА

Таблица 3. Элементный состав алюминия в области (1) на рис. 3

ZN	Серия	C, вес. %	C, ат. %
¹³ Al	К	92,86 ± 3,96	93,12
¹⁴ Si	К	7,14 ± 0,33	6,89

На рис. 3 представлено СЭМ-изображение алюминия после облучения с указанием площади 1, в которой был сделан РМЗА, а в табл. 3 приведен элементный состав.

Поверхность алюминиевого образца оказалась сильно разрушенной с наличием трещин и разломов, а также очищенной от примесей кислорода и углерода. Как будет видно из дальнейших измерений элементного состава поверхностей всех образцов в ДНРС-FT, большинство поверхностей оказались покрытыми различного состава марганцево-иттриевых соединениями, поэтому на рис. 4 представлены два СЭМ-изображения исходного слитка YMn₂ с разным увеличением, а в табл. 4 исходный элементный состав.

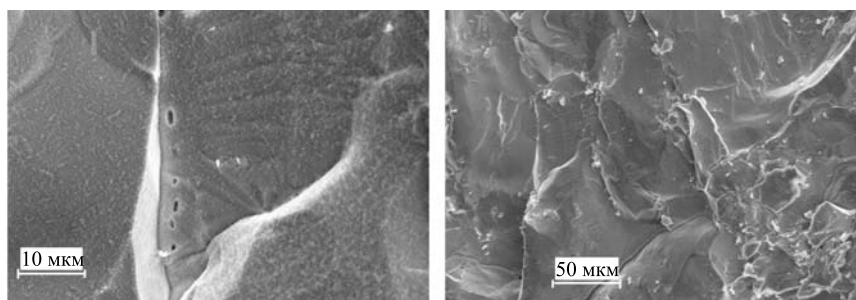


Рис. 4. СЭМ-изображения исходного слитка YMn₂ с различным увеличением. РМЗА был сделан для всей площади поверхности образца

Как видно, слиток достаточно однородный и имеет более или менее однородный химический состав, но с примесями углерода ((9,70 ± 1,66) вес. %) и кислорода ((6,43 ± 1,01) вес. %). Введем атомное отношение Mn/Y = C_{Mn} (ат. %)/C_Y (ат. %). Здесь атомное отношение Mn/Y = 2,56.

Таблица 4. Элементный состав исходного гомогенного сплава $Y Mn_2$ на рис. 4, где $Mn/Y = 2,56$

zN	Серия	C, вес. %	C, ат. %
6C	К	$9,70 \pm 1,66$	32,11
8O	К	$6,43 \pm 1,01$	15,98
^{13}Al	К	$0,23 \pm 0,04$	0,33
^{25}Mn	К	$51,22 \pm 1,19$	37,07
^{39}Y	L	$32,43 \pm 1,12$	14,50

На рис. 5 представлено СЭМ-изображение поверхности алюминия, покрытого кусками марганцово-иттриевого сплава и кремния, а в табл. 5 приведен элементный состав. Как видно, соотношение Mn и Y разительно поменялось (стало 3,78 ат. %) в сравнении с исходным (2,56 ат. %), а изменение концентрации кремния ($3,76 \pm 0,15$) вес. %.

На рис. 6 представлен другой участок поверхности алюминия, а в табл. 6 приведен элементный состав в т. 3.

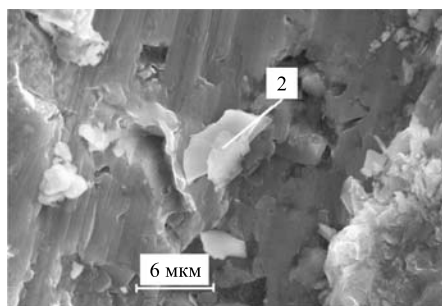


Рис. 5. СЭМ-изображение поверхности Al. РМЗА был сделан в выделенной точке 2

Таблица 5. Элементный состав в точке 2 на рис. 5, где $Mn/Y = 3,78$

zN	Серия	C, вес. %	C, ат. %
6C	К	$16,14 \pm 2,63$	34,06
8O	К	$9,37 \pm 1,34$	14,84
^{13}Al	К	$35,39 \pm 1,30$	33,26
^{14}Si	К	$3,76 \pm 0,15$	3,39
^{25}Mn	К	$24,76 \pm 0,56$	11,43
^{39}Y	L	$10,58 \pm 0,36$	3,02

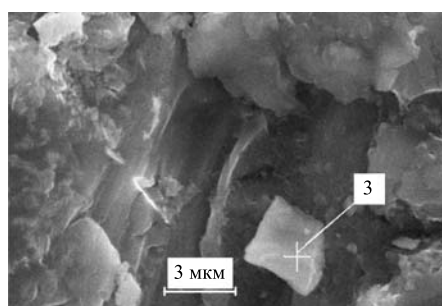


Рис. 6. СЭМ-изображение поверхности Al. РМЗА был сделан в выделенной точке 3

Таблица 6. Элементный состав в точке 3 на рис. 6, где $Mn/Y = 3,09$

zN	Серия	C, вес. %	C, ат. %
6C	К	$16,71 \pm 4,05$	39,82
8O	К	$8,12 \pm 1,86$	14,53
^{13}Al	К	$17,24 \pm 0,77$	18,29
^{14}Si	К	$1,99 \pm 0,12$	2,02
^{25}Mn	К	$36,74 \pm 1,00$	19,15
^{39}Y	L	$19,22 \pm 0,75$	6,19

Помимо отдельных частиц или групп частиц, на разрушенной поверхности алюминия и покрывающих ее обнаружены также выбросы, которые представлены на рис. 7, *а–г*.

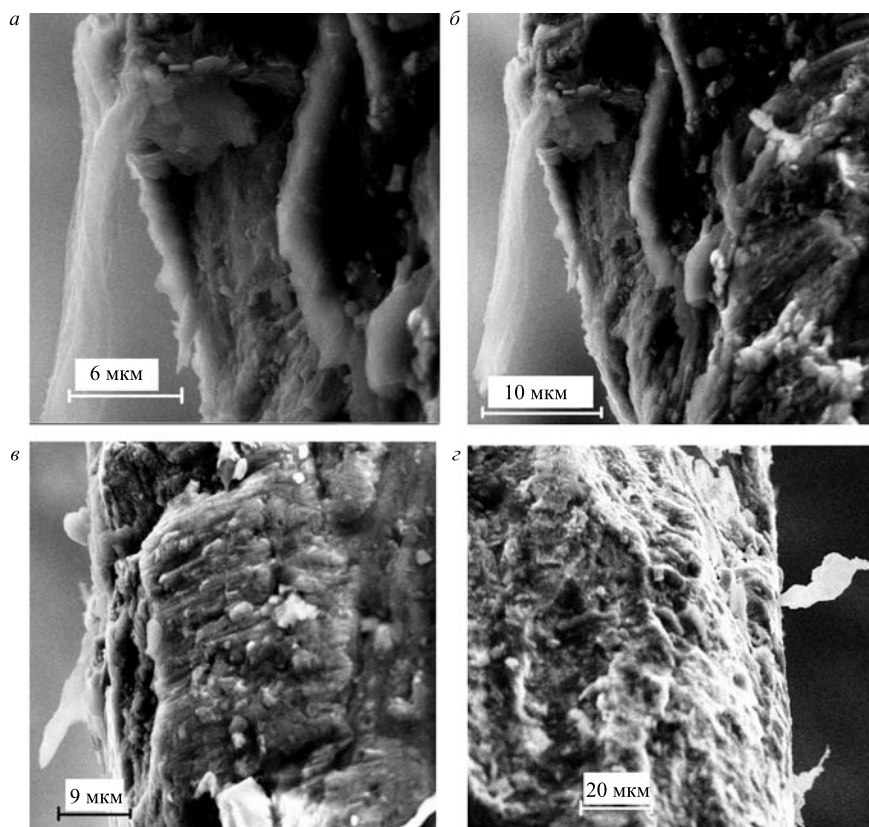


Рис. 7. Четыре СЭМ-изображения поверхности Al с застывшими выбросами различной формы в виде объектов различной протяженности и направлений

На рис. 8, *а* и *б* представлены два СЭМ-изображения одного и того же выброса из поверхности алюминия, но временное различие в сделанных изображениях обусловлено набором спектра характеристического рентгеновского излучения (ХСРИ). Выброс изменил форму при наборе спектра из-за нагрева, расплава и застывания.

В табл. 7 представлено распределение химических элементов в выбросе. Как видно, в табл. 7 присутствуют все элементы от ${}^6\text{C}$ до ${}^{20}\text{Ca}$, а также Fe и Cu. В таблицу включены также и не обнаруженные при РМЗА летучие

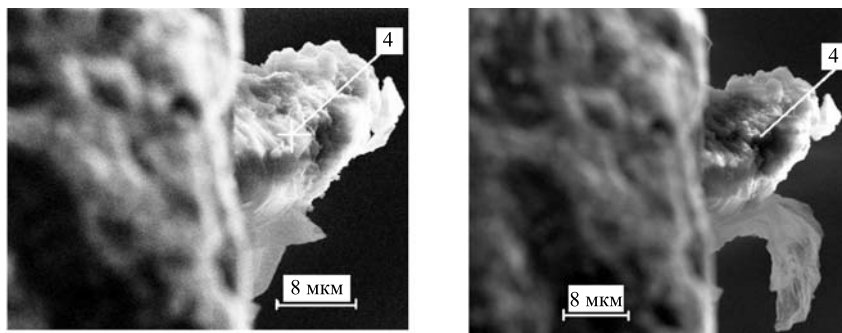


Рис. 8. Два СЭМ-изображения поверхности Al с застывшим выбросом, который в процессе экспозиции для ХСРИ изменил форму (переплавился)

Таблица 7. Элементный состав на поверхности алюминия. Анализ был сделан в выделенной т. 4 на рис. 8

ZN	Серия	C, вес. %	C, ат. %
${}^6\text{C}$	К	$24,93 \pm 4,16$	41,55
${}^8\text{O}$	К	$8,12 \pm 1,86$	14,53
${}^{11}\text{Na}$	К	$6,09 \pm 0,36$	5,30
${}^{12}\text{Mg}$	К	$0,70 \pm 0,07$	0,58
${}^{13}\text{Al}$	К	$18,21 \pm 0,73$	13,51
${}^{14}\text{Si}$	К	$0,43 \pm 0,05$	0,31
${}^{15}\text{P}$	К	$0,27 \pm 0,04$	0,17
${}^{16}\text{S}$	К	$1,02 \pm 0,06$	0,63
${}^{17}\text{Cl}$	К	$20,38 \pm 0,58$	11,51
${}^{19}\text{K}$	К	$8,46 \pm 0,25$	4,33
${}^{20}\text{Ca}$	К	$1,64 \pm 0,08$	0,82
${}^{26}\text{Fe}$	К	$0,38 \pm 0,05$	0,14
${}^{29}\text{Cu}$	К	$0,79 \pm 0,07$	0,25

элементы, такие как азот ($Z = 5$), фтор ($Z = 9$), неон ($Z = 10$) и аргон ($Z = 18$). В немалых количествах присутствуют ${}^{19}\text{K}$ ($(8,46 \pm 0,25)$ вес. %), ${}^{20}\text{Ca}$ ($(1,64 \pm 0,08)$ вес. %), а также ${}^{26}\text{Fe}$ и ${}^{29}\text{Cu}$.

На рис. 9 приведен еще один застывший выброс из поверхности алюминия с элементным составом, представленным в табл. 8 для контроля. Этот выброс также изменил свою форму при наборе спектра ХСРИ.

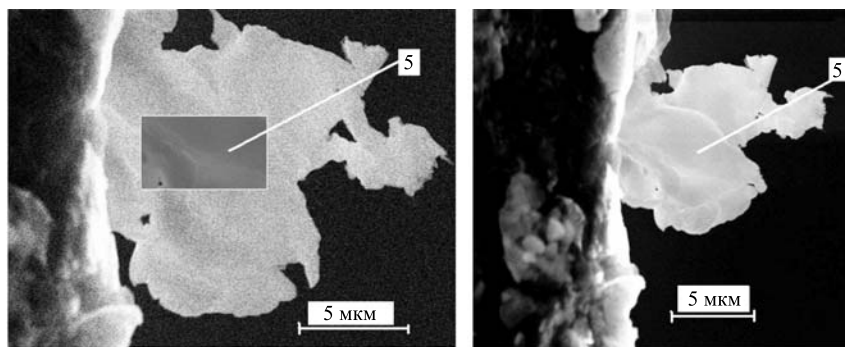


Рис. 9. Два СЭМ-изображения поверхности Al с застывшим выбросом, который в процессе экспозиции ХСРИ-выброса изменил форму (переплавился)

Таблица 8. Элементный состав на поверхности алюминия. Анализ был сделан в выделенной т. 5 на рис. 9

ZN	Серия	вес. %	ат. %
⁶ C	К	20,44 ± 5,00	32,83
⁸ O	К	10,38 ± 2,28	12,51
⁹ F†	К	20,08 ± 3,50	20,39
¹² Mg	К	1,28 ± 0,12	1,02
¹³ Al	К	44,41 ± 2,46	31,75
¹⁴ Si	К	0,64 ± 0,07	0,44
¹⁵ P	К	0,05 ± 0,03	0,03
¹⁶ S	К	0,07 ± 0,04	0,04
¹⁷ Cl	К	0,09 ± 0,04	0,5
¹⁹ K	К	0,12 ± 0,04	0,06
²⁰ Ca	К	0,64 ± 0,07	0,31
²⁵ Mn	К	0,30 ± 0,06	0,10
²⁶ Fe	К	0,45 ± 0,06	0,15
²⁹ Cu	К	1,06 ± 0,11	0,32

Из табл. 8 видно, что в этом выбросе высокая концентрация фтора, который находится в связанном состоянии, а именно: (20,08 ± 3,50) вес. %.

На рис. 10, а и б виден крупный застывший выброс из поверхности алюминия с длиной примерно 60 мкм, в основании которого заметно боль-

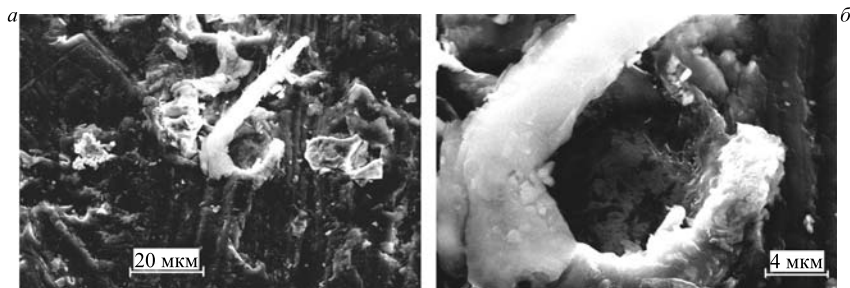


Рис. 10. СЭМ-изображение крупного застывшего выброса с углублением у его основания и длиной около 60 мкм

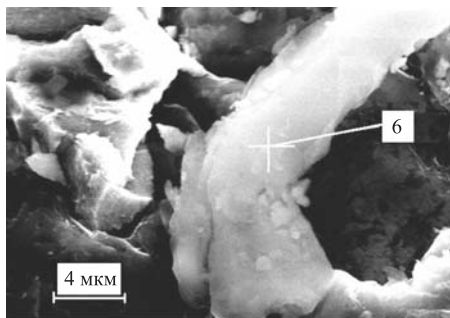


Рис. 11. СЭМ-изображение поверхности алюминия с застывшим выбросом с указанием места (т. 6), в котором проведен РМЗА

шее углубление в поверхности, а сам выброс имеет сложную спиралевидную форму.

На рис. 11 представлено изображение выброса и место, в котором проведен РМЗА. В табл. 9 дан элементный состав в промеренном участке (т. 6).

Приведем для наглядности участки поверхности алюминия с покрывающими ее инородными частицами, которые образовались из находящихся в ДНРС-FT других материалов, таких как кусочки $Y\text{Mn}_2$. На рис. 12, *a* представлен участок поверхности, на котором видны более или менее правильные многогранники, напоминающие отдельные кристаллы. Одна из таких структур показана на рис. 12, *б*, и проведен РМЗА. Элементный состав с промеренного многогранника представлен в табл. 10 (т. 7).

Из табл. 10 видно, что обнаруженный «параллелепипед», скорее всего, представляет собой монокристаллический $Y\text{Mn}_2$ исходного состава: на два атома марганца приходится примерно один атом иттрия.

Таблица 9. Элементный состав, полученный РМЗА-методом, на рис. 11 (т. 6), где $Mn/Y = 1,55$

ZN	Серия	C, вес. %	C, ат. %
⁶ C	К	33,20 ± 8,08	50,82
⁸ O	К	12,38 ± 3,15	14,22
¹¹ Na	К	1,10 ± 0,15	0,88
¹³ Al	К	45,79 ± 3,32	31,20
¹⁴ Si	К	0,77 ± 0,09	0,50
¹⁶ S	К	0,19 ± 0,05	0,11
¹⁷ Cl	К	0,76 ± 0,08	0,39
¹⁹ K	К	0,31 ± 0,05	0,15
²⁰ Ca	К	1,16 ± 0,09	0,53
²⁵ Mn	К	1,85 ± 0,11	0,62
²⁶ Fe	К	0,57 ± 0,06	0,19
³⁹ Y	L	1,93 ± 0,17	0,40

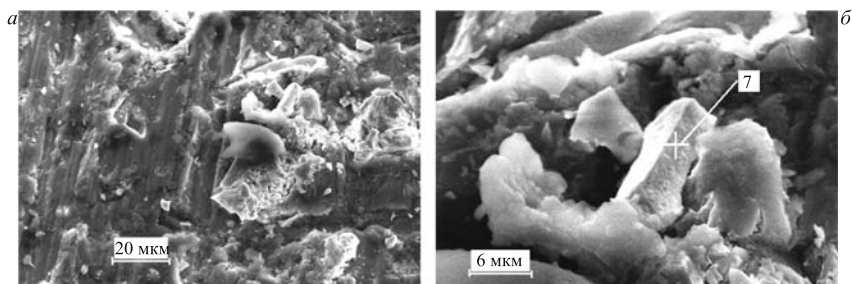


Рис. 12. Участок поверхности алюминия, покрытый разнородными частицами (рис. 12, а), и структура типа правильного «параллелепипеда» на рис. 12, б, на котором и проведен РМЗА в т. 7

Таблица 10. Элементный состав, полученный РМЗА-методом на рис. 12, б (т. 7), где $Mn/Y = 1,96$

ZN	Серия	C, вес. %	C, ат. %
⁶ C	К	6,10 ± 1,85	21,96
⁸ O	К	17,77 ± 1,09	28,48
²⁵ Mn	К	41,69 ± 1,35	32,81
³⁹ Y	L	34,44 ± 1,74	16,75

На рис. 13 представлено изображение расположенной на поверхности алюминия рядом с «параллелепипедом» аморфной структуры, на которой и проведен РМЗА, результаты которого описаны в табл. 11.

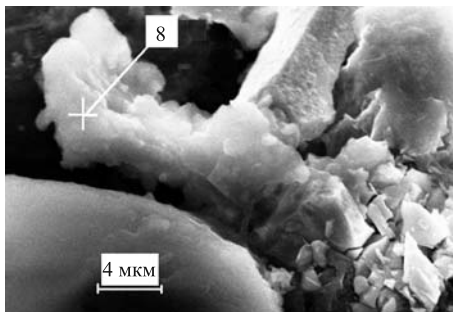


Рис. 13. СЭМ-изображение аморфной структуры, расположенной на поверхности алюминия рядом с «параллелепипедом», на которой и проведен РМЗА в т. 8

Таблица 11. Элементный анализ на рис. 13 в т. 8 (аморфная структура)

ZN	Серия	C, вес. %	C, ат. %
6C	K	4,65 ± 0,60	11,32
8O	K	10,08 ± 0,92	18,41
13Al	K	22,92 ± 0,50	24,83
14Si	K	1,38 ± 0,05	1,44
16S	K	0,35 ± 0,03	0,32
17Cl	K	11,31 ± 0,19	9,33
19K	K	21,07 ± 0,31	15,75
20Ca	K	21,18 ± 0,30	15,45
25Mn	K	2,27 ± 0,06	1,21
26Fe	K	2,02 ± 0,06	1,06
29Cu	K	0,68 ± 0,06	0,31
47Ag	L	2,08 ± 0,06	0,56

Из табл. 11 видно, что аморфная структура содержит помимо алюминия ((22,92 ± 0,50) вес. %) также значительные количества хлора ((11,31 ± 0,19) вес. %), калия ((21,07 ± 0,31) вес. %) и кальция ((21,07 ± 0,30) вес. %). Обнаружено также и серебро ((2,08 ± 0,06) вес. %).

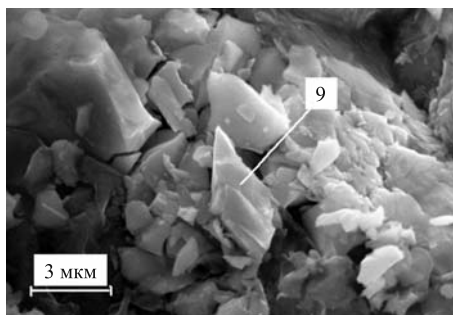


Рис. 14. СЭМ-изображение расположенной на поверхности алюминия рядом с «параллелепипедом» мелкодисперсной структуры, на которой и проведен РМЗА в т. 9

На рис. 14 представлены и проанализированы на элементный состав мелкие осколки, расположенные в правом нижнем углу рис. 13. Результаты РМЗА представлены в табл. 12.

В целом из табл. 12 можно сделать вывод, что ограниченные осколки малого размера представляют собой куски исходного гомогенного сплава $Y Mn_2$, изображенного на рис. 4, с элементным составом, приведенным в табл. 4.

Таблица 12. Элементный состав, полученный РМЗА-методом на рис. 14 (т. 9), где $Mn/Y = 2,51$

ZN	Серия	C, вес. %	C, ат. %
6C	К	$9,27 \pm 2,21$	32,72
8O	К	$2,90 \pm 0,78$	7,60
^{13}Al	К	$2,19 \pm 0,14$	3,44
^{25}Mn	К	$52,07 \pm 1,32$	40,17
^{39}Y	К	$33,57 \pm 1,26$	16,00

Представим также целый набор правильных многогранников типа «параллелепипедов», которые были обнаружены на поверхности алюминия и показаны на рис. 15. Элементный РМЗА, проведенный в т. 10, представлен в табл. 13.

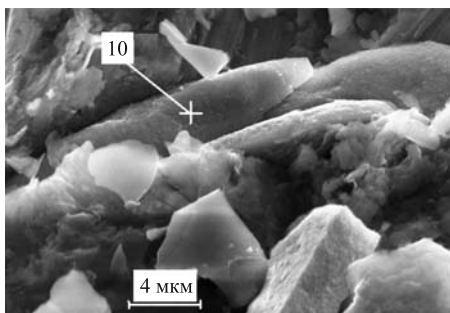


Рис. 15. СЭМ-изображения расположенных на поверхности алюминия целого набора правильных многогранников, в т. 10 одного из которых сделан РМЗА

Таблица 13. Элементный анализ на рис. 15 (т. 10)

ZN	Серия	C, вес. %	C, ат. %
6C	К	$5,22 \pm 1,66$	16,90
8O	К	$0,98 \pm 0,40$	2,38
^{13}Al	К	$18,80 \pm 1,00$	27,10
^{14}Si	К	$0,76 \pm 0,11$	1,05
^{25}Mn	К	$74,24 \pm 1,81$	52,56

Как видно, здесь полностью отсутствует такой элемент, как иттрий, а присутствует в значительном количестве марганец. Можно предположить, что эта правильная структура представляет монокристалл на основе марганца.

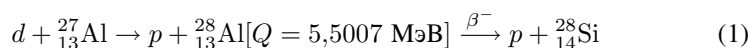
При этом все ДНРС-FT, изготовленные из нержавеющей стали (камеры высокого давления пальчикового типа, см. рис. 1), несмотря на прошедшее время, а именно более полутора лет, сохраняют высокую наведенную активность, что делает невозможным детальный анализ образовавшихся продуктов непосредственно внутри них, путем их разрезания вдоль продольной оси.

пешее время, а именно более полутора лет, сохраняют высокую наведенную активность, что делает невозможным детальный анализ образовавшихся продуктов непосредственно внутри них, путем их разрезания вдоль продольной оси.

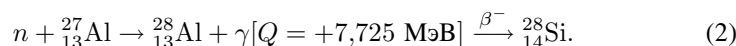
ВЫВОДЫ

На основании полученных экспериментальных данных можно заключить, что при воздействии γ -квантов непрерывного тормозного спектра от электронов с граничной энергией 23 МэВ в камере ДНРС-ФТ происходят ядерные реакции (см. [12]), приводящие к целому ряду новых эффектов.

- Элементный состав поверхности исходного алюминия, представленный в табл. 2, значительно изменился. Происходит своеобразная очистка поверхности (см. табл. 3). После облучения можно отметить небольшое увеличение концентрации кремния (было $(5,05 \pm 0,22)$ вес. %, стало $(7,14 \pm 0,33)$ вес. %), который может образовываться из реакции типа реакции Оппенгеймера [13]

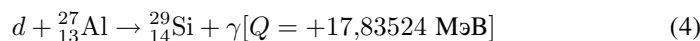
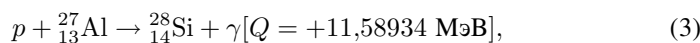


или прямым захватом теплового нейтрона из реакции фоторасщепления дейтрона $d(\gamma, p)n$:



Все данные для расчета выхода реакций взяты из [16–18].

Помимо реакций (1) и (2) может происходить и реакция подбарьерного слияния протона или дейтрона с ядром алюминия:



(см. также ассоциированные реакции внутренней конверсии с участием третьей частицы (e^- , p или d), предложенные в работах [14, 15]).

- Поверхность алюминия приобрела кратероподобный вид с трещинами и разломами (см. рис. 3, 5, 6). На поверхности алюминия обнаружены застывшие выбросы (см. рис. 7–11), которые при наборе статистики спектров ХСРИ для определения элементного состава этих выбросов начали изменять свою форму под действием относительно слабого электронного пучка (см. рис. 8, *a*, *б* и рис. 9, *a*, *б*). Элементный состав выбросов изменяется в широком диапазоне зарядов ядер от ${}_6\text{C}$ до ${}_{20}\text{Ca}$. В частности, в одном из выбросов присутствуют значительные количества таких элементов, как фтор в связанном состоянии, а именно: $(20,08 \pm 3,50)$ вес. % (рис. 9, табл. 8), а также в аморфного вида образовании (рис. 13, табл. 11) помимо алюминия $(22,92 \pm 0,50)$ вес. % обнаружены значительные количества хлора $((11,31 \pm 0,19)$ вес. %), калия $((21,07 \pm 0,31)$ вес. %) и кальция $((21,07 \pm 0,30)$ вес. %). Присутствует также и серебро $((2,08 \pm 0,06)$ вес. %).

- Особо следует отметить, что исходный слиток гомогенного YMn_2 (рис. 4, табл. 4), расположенный ближе к месту входа γ -квантов в

ДНРС-FT (см. 2 на рис. 1), в процессе облучения распался на множество частей различного вида и состава. При этом второй слиток гомогенного $Y\text{Mn}_2$, расположенный дальше от места входа γ -квантов (см. 4 на рис. 1) в процессе облучения распался на более крупные фракции, которые осели на поверхность ближе расположенных к нему медного образца (5 на рис. 1) и алюминиевого образца (3 на рис. 1), об элементном составе которых будет написано в следующей статье.

- Элементный анализ поверхности алюминия, покрытого продуктами распада гомогенных слитков $Y\text{Mn}_2$ (см. рис. 4, табл. 4 с соотношением $\text{Mn}/Y = 2,56$), позволил установить, что мелкие фракции распада (см. рис. 14, табл. 12) в большом весовом количестве, например для Mn: $(52,07 \pm 1,32)$ вес. % и для Y: $(33,57 \pm 1,26)$ вес. %, сохранили отношение $\text{Mn}/Y = 2,51$.

- Отдельные часто встречающиеся структуры на поверхности алюминия на основе элементов Mn и Y представляют собой:

- неправильной формы структуры ((см. рис. 5, табл. 5) с отношением $\text{Mn}/Y = 3,78$);

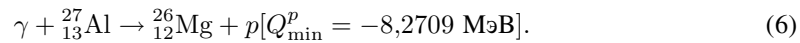
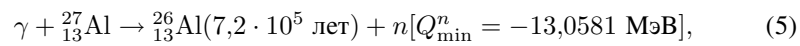
- с более или менее правильными формами структуры ((см. рис. 6, табл. 6) с отношением $\text{Mn}/Y = 3,09$);

- практически правильной формы параллелепипеда (рис. 12, б, табл. 10) с отношением $\text{Mn}/Y = 1,96$, которые, по-видимому, являются монокристаллами;

- практически правильной формы параллелепипеда (рис. 15, табл. 13) с концентрацией Mn: $(74,24 \pm 1,81)$ вес. % и 52,56 ат. % при полном отсутствии иттрия.

- *Следует особо отметить тот факт*, что в элементном составе застывших выбросов из поверхности относительно чистого алюминия (см. рис. 2 и табл. 2, рис. 3 и табл. 3, а также рис. 8 и табл. 7, рис. 9 и табл. 8, рис. 10, 11 и табл. 9) присутствуют элементы, начиная от углерода с $Z = 6$ до меди с $Z = 29$, которые представляют собой либо элементы, уже имевшиеся и сконцентрировавшиеся в процессе произошедших ядерно-химических реакций в застывших сгустках выброшенного вещества из алюминия, либо образовавшиеся в результате ядерных реакций новые элементы, более тяжелые, чем алюминий, и которые за счет высоких температур в месте их образования и создали такие оригинальные структуры выбросов.

Приведем (γ, n) - и (γ, p) -реакции γ -кванта с энергией до 23 МэВ с алюминием:



Как легко показать исходя из капельной модели ядра с большим угловым моментом, ядра средних масс могут испытывать асимметричное деле-

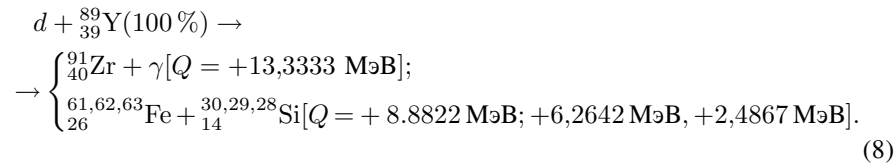
ние [12, 19–21]. Тогда при энергии γ -кванта $E_\gamma > |Q_{\min}|$ частицы из реакций (5) и (6) приобретут энергии

$$E_{p^{(n)}} = \frac{E_\gamma - |Q_{\min}^{p^{(n)}}|}{m_{p^{(n)}} + M_{p^{(n)}}} M_{p^{(n)}}, \quad E_{M_{p^{(n)}}} = \frac{E_\gamma - |Q_{\min}^{p^{(n)}}|}{m_{p^{(n)}} + M_{p^{(n)}}} m_{p^{(n)}}, \quad (7)$$

где $M_p \equiv M_{26\text{Mg}}$ и $M_n \equiv M_{26\text{Al}}$. Следовательно, максимальные энергии тяжелых частиц составят $E_{\text{Mg}}^{\max} \approx 0,54$ МэВ и $E_{\text{Al}}^{\max} \approx 0,37$ МэВ. Эти энергии не кажутся достаточными для сколько-нибудь эффективных подбарьерных процессов слияния. Реакции деления алюминия на более легкие осколки под действием нейтронов, протонов и дейтронов относительно низких энергий не проходят по энергетическим соображениям.

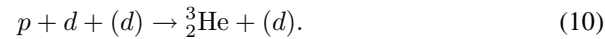
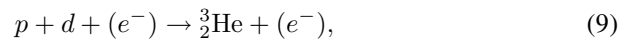
Судя по обнаруженным изменениям, принимая во внимание наличие на поверхности алюминия *структур в форме параллелепипедов, состоящих из Mn и Y или только из соединений Mn и являющихся, скорее всего, монокристаллами*, можно сделать вывод о наличии в процессах их образования высоких температур, при которых был бы возможен их рост до столь значительных размеров (см. рис. 12 и рис. 15). Причем оценочные размеры параллелепипедов примерно $12 \times 4 \times 4$ мкм, но параллелепипеды разного состава: один тип с атомным отношением $\text{Mn}/\text{Y} = 1,96$, а другой тип с содержанием марганца более $(74,24 \pm 1,81)$ вес. % или 52,56 ат%.

Обнаруженные аномалии в химическом составе можно объяснить делением иттрия в реакциях только с дейтронами, например



Можно написать и другие реакции при подбарьерном слиянии дейтерия и иттрия с асимметричным делением.

Представляет интерес привести здесь результаты работ [14, 15], в которых рассматриваются ядерные реакции 2-го порядка, так называемая твердотельная внутренняя конверсия с помощью третьей заряженной частицы (electron or heavy charge particle assisted nuclear processes), такие как:



В этих реакциях энергия возбуждения составного ядра не излучается в виде энергичного γ -кванта с $E_\gamma \approx Q$, а возбуждение снимается кинетическими

энергиями легкого и более тяжелого продукта реакции. В обзорной работе авторов [14, 15] делается вывод, что если помогающей (assisted) частицей является протон, то в протонно-ассоциированной реакции ядерного захвата создается энергичный протон с энергиями порядка нескольких МэВ, который при его последующих процессах замедления может создавать вторичные свободные протоны, если такие протоны присутствуют в кристалле. Такие вторичные протоны могут принимать дальнейшее участие в протонно-ассоциированных реакциях ядерного синтеза. Таким образом, вторичные протоны могут играть такую же роль, как вторичные нейтроны в случае ядерного деления, создавая цепные реакции деления.

Помимо рассмотренных реакций в [12] следует также учесть и атомные процессы, связанные с рассеянием γ -квантов на атомах, такие как комптон-эффект, фотоэффект и рождение пар. А также необходимо принять во внимание и процессы упругого рассеяния γ -квантов, особенно при граничной энергии тормозных γ -квантов в 23 МэВ на легких ядрах (протонах, дейтронах), тогда максимально переданная им энергия

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

где M — масса ядра. Тогда для энергии γ -квантов $E_{\gamma} = 10$ МэВ имеем $T_p \approx 209$ кэВ и $T_d \approx 105$ кэВ для протона и дейтрона соответственно.

Квазиклассический подход с введением двугорбого ион-ионного потенциала, описывающий резонансное подбарьерное слияние сферических ядер среднего атомного номера (типа ${}_{40}\text{Zr} + {}_{40}\text{Zr}$) был развит в работах [22–24]. Два барьера позволяют сталкивающимся ядрам находиться на малых расстояниях друг от друга длительное время, что делает возможным образование общей электронной оболочки в системе даже без образования составного ядра.

Образование и вращение двойной ядерной системы при глубоконеупругих столкновениях с многонуклонными передачами представлен в монографии [25] (см. цитированные там работы). Такая двойная ядерная система реализуется при больших кинетических энергиях бомбардирующих ионов, что в нашем случае не имеет места.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Didyk A. Yu., Wisniewski 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., Wisniewski R.* Chemical Composition and Structural Phase Changes of Novel Synthesized Structure and of Pd Sample under γ -Quanta Irradiation in Dense Deuterium Gas // *Part. Nucl., Lett.* 2012. V. 9, No. 8. P. 615–631; JINR Preprint E15-2012-34. Dubna, 2012. 26 p.

3. 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.
4. Wisniewski R., Didyk A. Yu., Wilczinska-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. of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2013. V. 7, No. 2. P. 239–247.
5. Вишневецкий Р., Дидык А. Ю., Вилчинска-Китовска Т. Фоторасщепление дейтрона, термоядерные и реакции деления ядер, вызванные γ -квантами в насыщенном дейтерием палладии и плотном газообразном дейтерии с синтезом новых структур // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013. Т. 7, № 2. С. 239–247.
6. Дидык А. Ю., Вишневецкий Р., Вилчинска-Китовска Т. Изменения структуры поверхности и элементного состава Pd-стержня и сборника продуктов ядерных и химических реакций, облученных 10 МэВ-ными γ -квантами в плотном дейтерии. Препринт ОИЯИ Р15-2013-15. Дубна, 2013. 39 с.
7. Дидык А. Ю., Вишневецкий Р., Вилчинска-Китовска Т. Изменения свойств поверхности и элементного состава компонентов камеры высокого давления с Pd-стержнем внутри, облученных 10 МэВ-ными γ -квантами в плотном дейтерии. Препринт ОИЯИ Р15-2013-20. Дубна, 2013. 32 с.
8. 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.
9. 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.
10. Ишханов Б. С., Капитонов И. М. Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1979. 215 с.
11. Дидык А. Ю., Вишневецкий Р., Вилчинска-Китовска Т. Устройство для получения энергии. Патент на полезную модель № 122197 от 21 июня 2012 г.
12. Didyk A. Yu., Wisniewski R. Phenomenological Nuclear-Reaction Description in Deuterium-Saturated Palladium and Synthesized Structure in Dense Deuterium Gas under γ -Quanta Irradiation // Part. Nucl., Lett. 2013. V. 10, No. 3(180). С. 437–457; JINR Preprint E15-2012-35. Dubna, 2012. 25 p.
13. Oppenheimer J. R., Phillips M. Note for the Transmission Functions for Deuteron // Phys. Rev. 1935. V. 48, No. 15. P. 500–502.
14. Kálmán P., Keszthelyi T. Solid State Internal Conversion // Phys. Rev. C. 2004. V. 69. P. 031606-1–031606-3.
15. Kálmán P., Keszthelyi T. Lattice effect in solid state internal conversion // Phys. Rev. C. 2009. V. 79. P. 031602-1–031602-4.
16. WebElements. Periodic Tables of the Elements/Rhenium/Crystal Structures.

17. Физических величины: Справ. / Под ред. Григорьева И. С. и Мейлихова Е. З. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1233 с.
18. *Голашвили Т. В., Чечев В. П., Бадиков С. А.* Справочник нуклидов. М.: Изд. Дом МЭИ, 2011. 461 с.
19. *Moretto Luciano G.* Statistical Emission of Large Fragments: a General Theoretical Approach // Nucl. Phys. A. 1975. V. 247. P. 211–230.
20. *Sierk A. J.* Mass-Assymmetric Fission of Light Nuclei // Phys. Rev. 1985. V. 55, No. 6. P. 582–583.
21. *Sierk A. J.* Macroscopic Model of Rotating Nuclei // Phys. Rev. C. 1986. V. 33, No. 6. P. 2039–2052.
22. *Шилов В. М.* Подбарьерное слияние сферических ядер среднего атомного номера // ЯФ. 2012. Т. 75, № 4. С. 485–490.
23. *Тараканов А. В., Шилов В. М., Шмидт Р.* Квазиклассическое описание слияния тяжелых ядер при около барьерных энергиях // Ядерная физика. 1991. Т. 53, № 5. С. 1285–1291.
24. *Пермяков В. П., Шилов В. М.* Подбарьерное слияние сложных ядер // ЭЧАЯ. 1989. Т. 20, вып. 6. С. 1396–1435.
25. *Волков В. В.* Ядерно-физические исследования с тяжелыми ионами // Избранные работы. Дубна: ОИЯИ, 2012. С. 111–114.

Получено 17 апреля 2013 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 16.08.2013.

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

Усл. печ. л. 1,31. Уч.-изд. л. 1,53. Тираж 225 экз. Заказ № 58047.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/