

P15-2014-104

А. Ю. Дидык *, Р. Вишневецкий ^{1,**},
Т. Вилчиньска-Китовска ¹, Л. Д. Исхакова ^{2,***}

СИНТЕЗ МИКРОЧАСТИЦ В ПЛОТНОМ ВОДОРОДЕ
ПРИ ДАВЛЕНИИ 3,5 кбар С ОЛОВЯННЫМ СТЕРЖНЕМ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТОРМОЗНЫХ γ -КВАНТОВ
С ПОРОГОВОЙ ЭНЕРГИЕЙ 10 МэВ

Направлено в «Журнал технической физики»

¹ Национальный центр ядерных исследований, Отвоцк, Польша

² Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

* E-mail: didyk@jinr.ru

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

*** E-mail: ldisk@fo.gpi.ru

Дидык А. Ю. и др.

P15-2014-104

Синтез микрочастиц в плотном водороде при давлении 3,5 кбар с оловянным стержнем под действием тормозных γ -квантов с пороговой энергией 10 МэВ

Образец в виде стержня 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 извлечены в значительном количестве синтезированные микрочастицы, которые отделились от стенок реакционной камеры. Проведены исследования элементного состава и микроструктуры всех обнаруженных микрочастиц и внутренних поверхностей компонентов ННРС, включая стержень из олова. Установлено, что микрочастицы можно условно подразделить на три типа: ленточные, плотные и рыхлые. В результате облучения ННРС тормозными γ -квантами произошли ядерные реакции с образованием легких элементов от углерода до металлов средних масс, а также более тяжелых, например бария. Обсуждаются 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. et al.

P15-2014-104

Synthesis of Microparticles in Dense Hydrogen at a Pressure of 3.5 kbar with a Tin Rod under Irradiation with Braking γ -Rays of a Threshold Energy of 10 MeV

A rod of pure (99.98%) tin was placed in a hydrogen high-pressure chamber (ННРС) at a pressure of 3.5 kbar was irradiated with braking γ -rays of 10 MeV threshold energy. Upon opening the ННРС, a large number of synthesized microparticles 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 ННРС components, including the tin rod, have been carried out. It is found that the microparticles can be divided into three types: banded, loose and compact. As a result of irradiation of the ННРС with the 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 ранее выполненных исследований были изучены изменения элементного состава, структуры всех внутренних поверхностей и множественные синтезированные образования (макро- и микрочастицы) из ранее отсутствовавших химических элементов в насыщенном дейтерием палладии в плотном газообразном молекулярном дейтерии [1–13], в металлах (Al, V, Cu, Re) и сплавах (YМn₂, нержавеющая сталь) в плотном газообразном дейтерии [14–19], в палладии, насыщенном водородом [20–23], в плотном газообразном молекулярном водороде [24, 25], в плотном газообразном гелии [26]. Модельный подход для описания всех возможных ядерных реакций и атомных процессов при облучении 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 конспективно в работах [21, 24, 26, 27].

Цель данной работы — исследовать изменения элементного состава и структур, которые образуются на внутренней поверхности реакционной камеры, заполненной плотным молекулярным водородом с образцом из олова, при воздействии γ -квантов с энергией 10 МэВ.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ И ПАРАМЕТРЫ ОБЛУЧЕНИЯ γ -КВАНТАМИ

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

Как видно, внутри камеры был расположен достаточно массивный образец в виде цилиндра из олова (поз. 2) с чистотой (99,98 %) с исходной массой 8,5731 г при длине 17 мм и диаметре 9,5 мм. С обеих сторон 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 из ББ. Входное окно (поз. 1), как и ранее [1–13], 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].

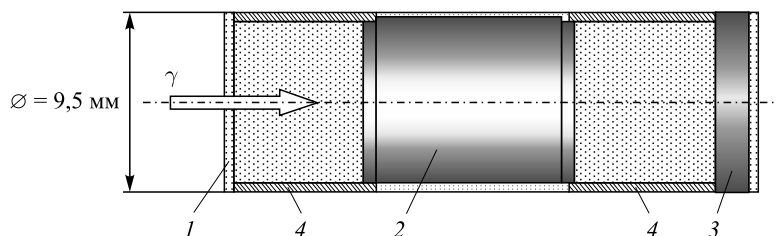


Рис. 1. Схема реакционной камеры, заполненной водородом с образцом Sn: 1 — входное окно из бериллиевой бронзы; 2 — образец олова; 3 — сборник продуктов; 4 — две реакционные камеры (втулки)

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

При вскрытии камеры измеренное значение давления водорода оказалось равным примерно 3,0 кбар, а из реакционной камеры выпало значительное количество частиц черного цвета (примерно 30–40 шт.). Все внутренние поверхности компонентов ННРС (поз. 1–4), имевшие контакт с водородом, и значительная часть этих синтезированных частиц были исследованы методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) и рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии (РЭДС), позволяющей провести определение элементов от В до U с чувствительностью до десятых долей процента. Измерения были проведены в нескольких независимых центрах (см. также описание центров в [32, 33]), включая аналитический центр НЦВО РАН (РЭМ, JSM-5910LV, JEOL с аналитической системой AZtecEnergy «Oxford Instruments»). Поскольку анализ элементного состава производился с образцов с исходной неровной поверхностью, без пробоподготовки с приготовлением образца с полированной поверхностью, полученные результаты носят качественный характер. Основной задачей этого анализа было обнаружение новых элементов, образовавшихся в процессе синтеза.

2. СВОЙСТВА И ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ИЗУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ РЭМ И РЭДС ЧАСТИЦ

Общим для всех изученных частиц было их образование из химических элементов в газовой фазе. Возможно, они представляют собой углеводородные

полимеры, образовавшиеся в процессе гидрирования углерода; к сожалению, метод РЭДС не позволяет провести элементный анализ на содержание водорода.

В соответствии с микроструктурой среди синтезированных частиц, обнаруженных в объеме ННРС перед цилиндром из олова и в объеме за ним, можно выделить три характерных типа: ленточные, светлые плотные и рыхлые, представляющие собой агломерат из мелкодисперсных частиц.

На рис. 2 приведены: РЭМ-изображение в отраженных электронах (Z -контраст) частицы, состоящей из протяженных полос длиной более 1,26 мм и шириной порядка 0,80 мм (*a*), и рентгеновские эмиссионные спектры 1 и 2 (*b*). Из рис. 2, *a* видно, что на образовавшихся ленточных структурах с углеродной основой имеются микрообласти с включением элементов с большими, чем у углерода, атомными номерами (светлые участки в Z -контрасте).

Оценка элементного состава показывает, что в микрообластях преобладает набор элементов Na, Al, P, Si, S, Cl, K, Ca, Ti и Fe, содержание которых находится в пределах 0,02–0,27 масс. %. Основными компонентами в них являются оксиды Na, Al и Si. Следует отметить, что содержание титана хотя и мало, но превышает порог чувствительности определения. Присутствие оксидов в условиях данного эксперимента может объясняться достаточно низкой температурой в камере.

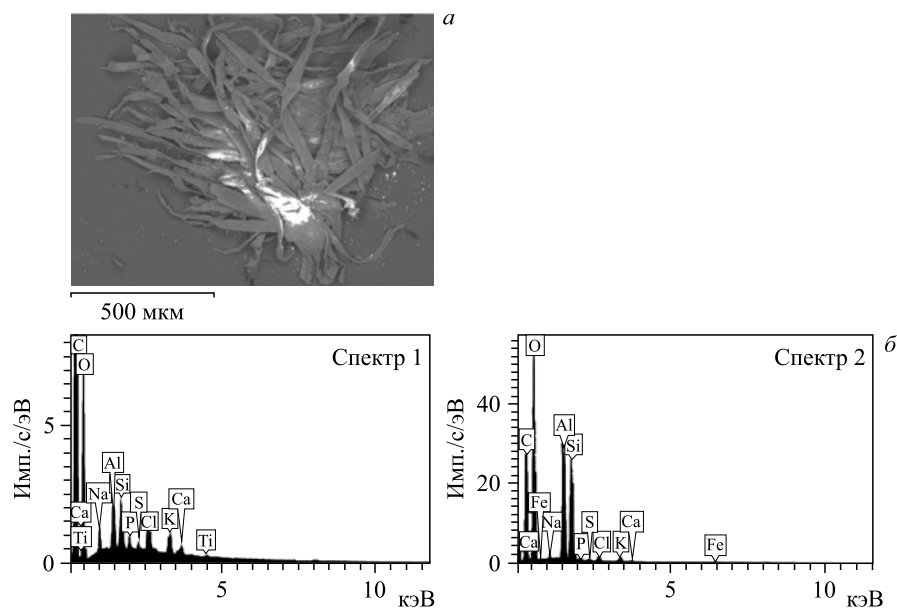


Рис. 2. РЭМ-изображение частицы, состоящей из протяженных полос (*a*), и рентгеновские эмиссионные спектры (*b*)

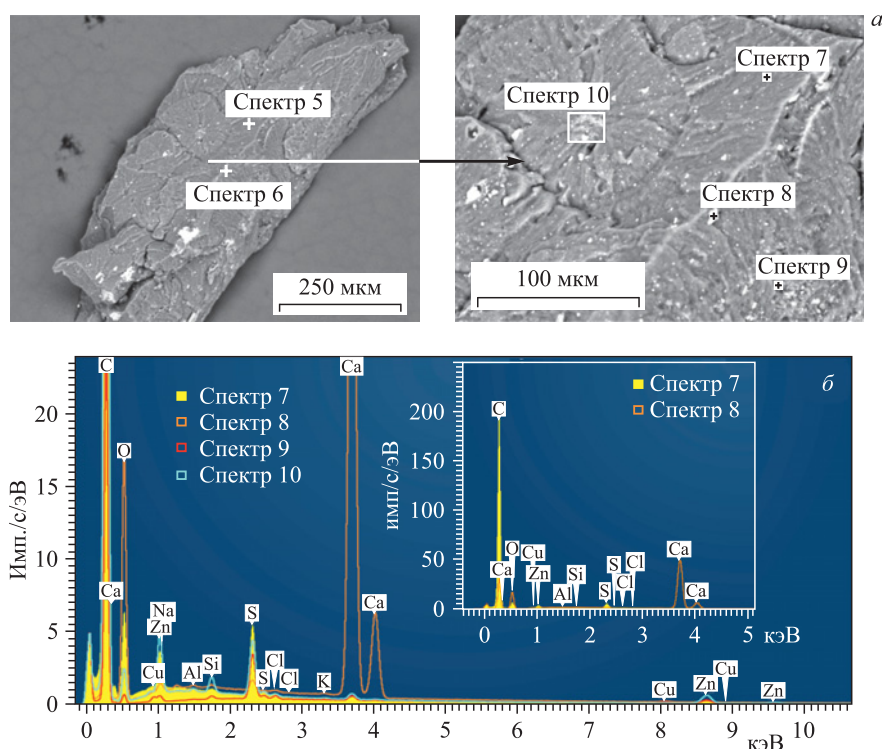


Рис. 3. РЭМ-изображения светлой частицы (а) и сопоставление спектров различных ее участков (б)

Спектры нескольких исследованных светлых плотных частиц указывали на аналогию в их составе: на фоне углеродной основы регистрировалось присутствие калия, алюминия, кремния, серы, хлора, кальция, меди и цинка.

Из сопоставления РЭМ-изображений участков частицы с разным увеличением (рис. 3) видно, что размер частиц (белые включения) на углеродной основе (серая масса) колеблется от нанометровых до миллиметровых размеров. Частицы имеют различающиеся составы, что видно из сопоставления спектров. При этом самостоятельную фазу образуют соединения кальция (см. рис. 3, б) с его содержанием 27,2 масс.%. Из остальных примесей в существенных количествах присутствуют $S \leq 3,3$ масс.%, $Zn \leq 2$ масс.%, $Cu \leq 1,1$ масс.%. Остальные элементы содержатся в следовых количествах.

Иная картина наблюдается при исследовании элементного состава рыхлых частиц (рис. 4). Отличительная особенность этих рыхлых агломератов из мелких частиц — появление в их составе такого тяжелого элемента, как барий (12–28 масс.%), а также наличие фтора (12–24 масс.%), кремния

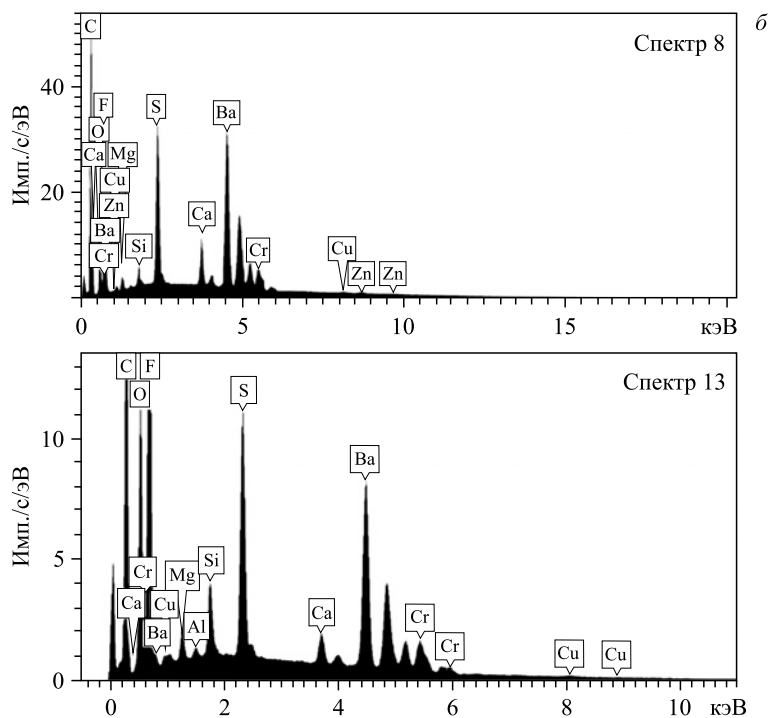
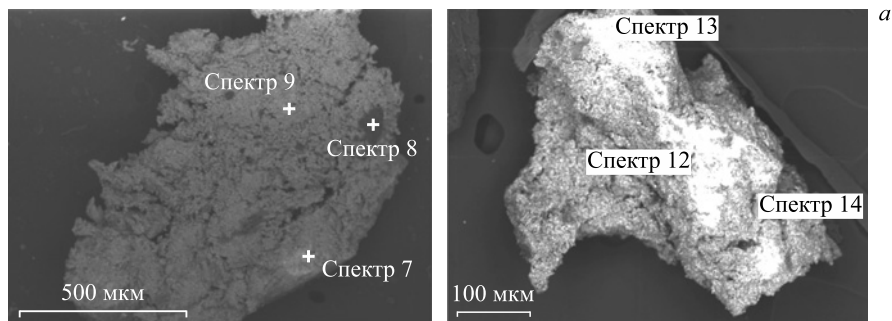


Рис. 4. РЭМ-изображения двух рыхлых частиц (а) и сопоставление рентгеноэмиссионных спектров их участков (б)

(до 23 масс. %), серы (0,3–4,5 масс. %), хрома (1,1–1,88 масс. %) и магния (0,36–0,64 масс. %). Из сопоставления всех полученных от этих частиц спектров видно, что образовавшиеся микровключения неоднородны по химическому составу.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

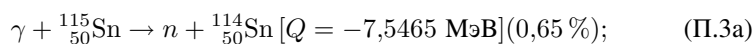
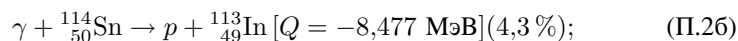
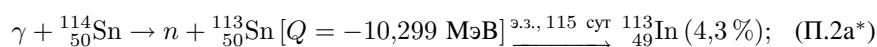
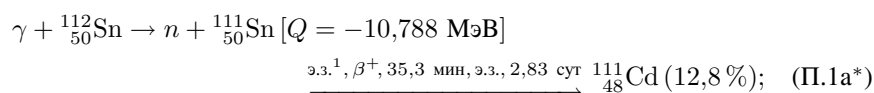
РЭМ- и РЭДС-исследования трех видов синтезированных частиц: ленточных, светлых плотных и рыхлых, представляющих агломераты из мелкодисперсных частиц, — позволили охарактеризовать их строение и элементный состав. Было показано, что ленточные структуры содержат углерод, кислород, натрий, алюминий, кремний, фосфор, серу, хлор, калий, кальций, титан и железо. В светлых плотных частицах обнаружены натрий, кремний, сера, хлор, кальций, медь и цинк. Рыхлые частицы отличаются высоким содержанием бария, фтора, серы, хрома, в них найдены также кислород, натрий, магний, алюминий, кремний, кальций, железо, медь и цинк. Прояснить природу исследованных образований позволит микрорентгенофазовый анализ, для которого желательно получить эти объекты в большем количестве.

В приложении приведена часть реакций, которые, возможно, могли привести к обнаруженному элементному составу частиц и других объектов внутри ННРС, детально описанная в работах [32, 33].

Приложение

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

Приведем фотоядерные реакции (γ, n) и (γ, p) на десяти природных изотопах олова: $^{112}_{50}\text{Sn}$ (0,97 %), $^{114}_{50}\text{Sn}$ (0,65 %), $^{155}_{50}\text{Sn}$ (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 %) [31, 34]:



¹ э.з. — электрозахват.

$$\gamma + {}^{115}_{50}\text{Sn} \rightarrow p + {}^{114}_{49}\text{In} [Q = -8,748 \text{ МэВ}] \xrightarrow{\beta^-, 71,9 \text{ с}} {}^{114}_{50}\text{Sn} (0,65\%); \quad (\text{П.36}^*)$$

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

$$\gamma + {}^{116}_{50}\text{Sn} \rightarrow p + {}^{115}_{49}\text{In} [Q = -12,274 \text{ МэВ}] (4,41 \cdot 10^{14} \text{ лет}, 95,7\%); \quad (\text{П.46}^*)$$

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

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

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

$$\gamma + {}^{118}_{50}\text{Sn} \rightarrow p + {}^{117}_{49}\text{In} [Q = -9,9986 \text{ МэВ}] \xrightarrow{\beta^-, 2,49 \text{ ч}} {}^{117}_{50}\text{Sn}; \quad (\text{П.66}^*)$$

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

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

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

$$\gamma + {}^{120}_{50}\text{Sn} \rightarrow p + {}^{119}_{49}\text{In} [Q = -10,6608 \text{ МэВ}] \xrightarrow{\beta^-, 2,4 \text{ мин}} {}^{119}_{50}\text{Sn}; \quad (\text{П.86}^*)$$

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

$$\gamma + {}^{122}_{50}\text{Sn} \rightarrow p + {}^{121}_{49}\text{In} [Q = -11,393 \text{ МэВ}]$$

$$\xrightarrow{\beta^-, 23,1 \text{ с}; \beta^-, 27,06 \text{ ч}} {}^{121}_{51}\text{Sb} (57,3\%); \quad (\text{П.96}^*)$$

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

$$\gamma + {}^{124}_{50}\text{Sn} \rightarrow p + {}^{123}_{49}\text{In} [Q = -12,089 \text{ МэВ}]$$

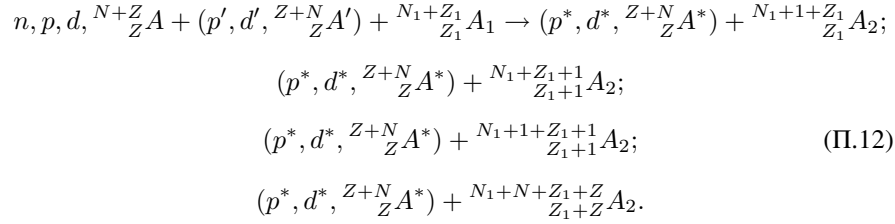
$$\xrightarrow{\beta^-, 5,98 \text{ с}; \beta^-, 129,2 \text{ сут}} {}^{123}_{51}\text{Sb} (42,7\%). \quad (\text{П.106}^*)$$

В (П.1)–(П.10) символом «*» помечены реакции, которые не могут протекать, так как энергии γ -квантов $E_\gamma < |Q|$.

В работах [35, 36] 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 в твердом теле энергия возбуждения составного ядра в реакциях типа

$$\begin{aligned} n, p, d, {}^N_Z A + {}^{N_1+Z_1}_{Z_1} A_1 &\rightarrow \gamma + {}^{N_1+1+Z_1}_{Z_1} A_2; \quad \gamma + {}^{N_1+Z_1+1}_{Z_1+1} A_2; \\ &\gamma + {}^{N_1+1+Z_1+1}_{Z_1+1} A_2; \quad \gamma + {}^{N_1+N+Z_1+Z}_{Z_1+Z} A_2 \end{aligned} \quad (\text{П.11})$$

снимается не испусканием γ -кванта, а передается третьей заряженной сопутствующей частице («associated particle», см. [35, 36]) p^* , d^* или ядру решетки твердого тела ${}^{Z+N}_Z A^*$, т. е. протекают реакции вида



Ясно, что при этом сопутствующие частицы p^* , d^* или ядро решетки твердого тела ${}^{Z+N}_Z A^*$ приобретают значительные энергии. В круглых скобках в (П.12) отмечены сопутствующие частицы.

Протон или молекула водорода могут при упругом рассеянии на них γ -кванта с энергией E_γ приобрести максимальную энергию [28, 37]

$$E_M^{\max} = E_\gamma \left(1 + \frac{Mc^2}{2E_\gamma} \right)^{-1}, \quad (\text{П.13})$$

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

$$\begin{aligned} E_{\text{H}}^{\max}(10 \text{ МэВ}) &= 208,6 \text{ кэВ}; & E_{\text{H}_2}^{\max}(10 \text{ МэВ}) &= 105,4 \text{ кэВ}, \\ E_{\text{H}}^{\max}(25 \text{ МэВ}) &= 1,264 \text{ МэВ}; & E_{\text{H}_2}^{\max}(25 \text{ МэВ}) &= 665,5 \text{ кэВ}. \end{aligned} \quad (\text{П.14})$$

Сечения прямого рассеяния γ -кванта на ядрах малы (см., например, [38, 27, 28]). Но при взаимодействии γ -квантов происходят не прямые процессы, такие как фотоэффект, эффект Комптона и рождение пар e^-e^+ [20, 23, 28], в результате которых образуются высокоэнергетические электроны и позитроны.

Отметим, что максимальные переданные энергии в (П.14) можно представить в виде максимальных температур атомов и молекул водорода $T_{\text{H}, \text{H}_2}^{\max} = \frac{2}{3} E_{\text{H}, \text{H}_2}^{\max} / k_B$, где $k_B = 8,617 \cdot 10^{-5}$ эВ/К:

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

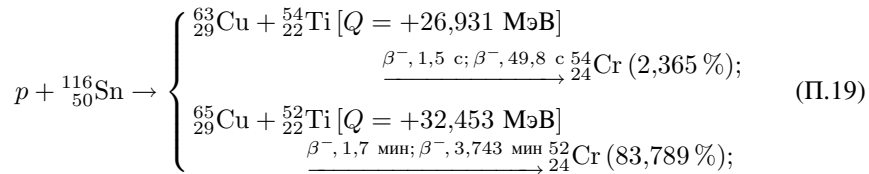
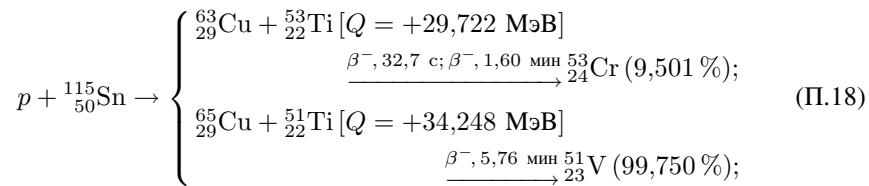
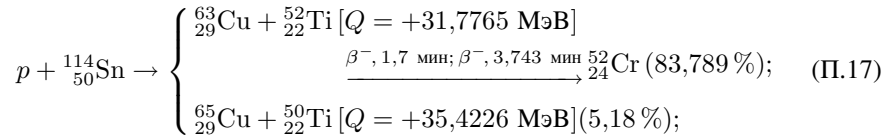
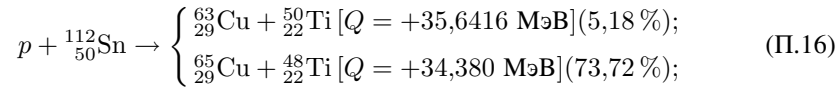
Как известно, температура на поверхности Солнца составляет 5800 К, а в центре — $15,6 \cdot 10^6$ К [30, 39]. В нашем случае локальная температура может

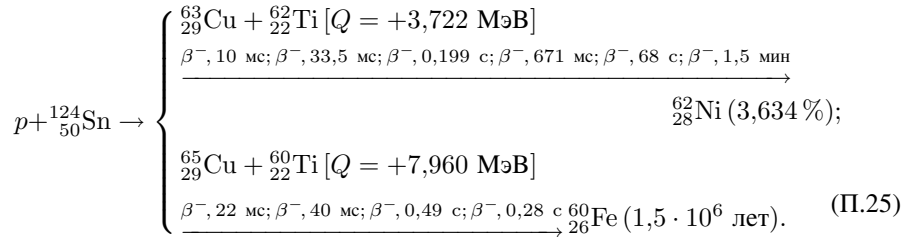
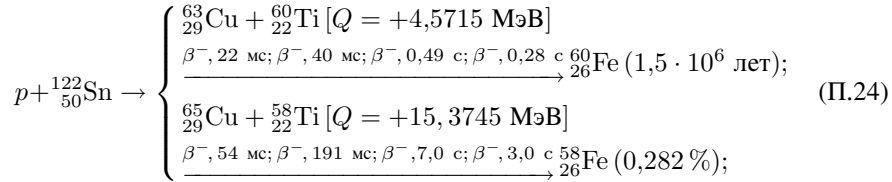
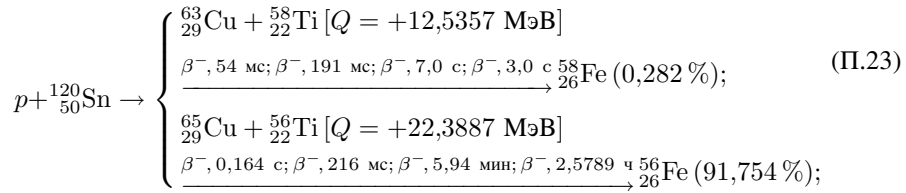
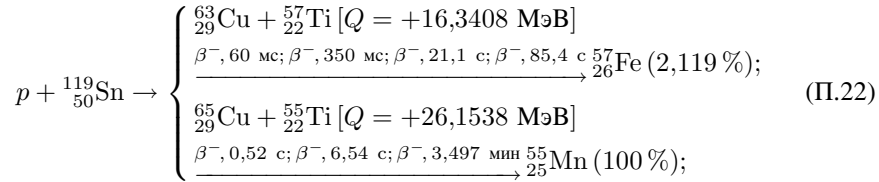
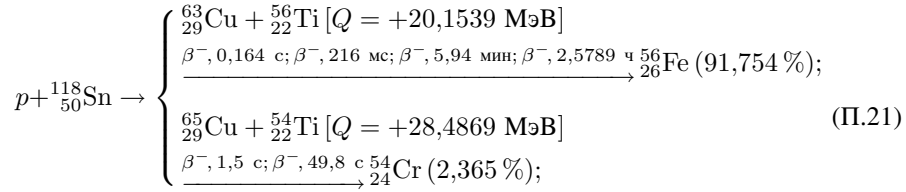
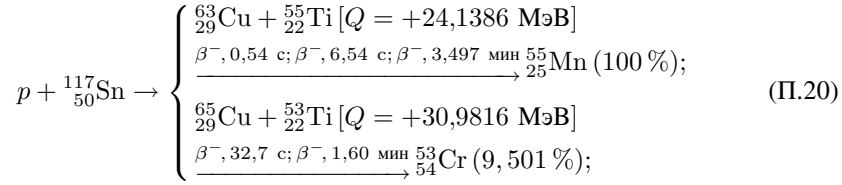
быть значительно выше (см. выражения (П.15)), поэтому реакции с протонами, так называемое выгорание протонов по гелиевому циклу Бете [40, 41], могут происходить (как известно, реакция $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$ протекает при слабом взаимодействии) с предельно малыми вероятностями (см. также монографии [29, 30]).

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. [21–24, 28, 32, 33]), как и в плотном гелии (при давлениях 1,1 и 3,05 кбар) (см. [25, 26]), позволили сделать вывод о том, что реакции синтеза (восходящие реакции) и деления (нисходящие реакции), по-видимому, имеют место.

В работах [42–44] показано, что при повышении углового момента в капельной модели ядра происходит снижение барьера деления и становятся возможными реакции асимметричного деления ядер.

Как видно из результатов РЭДС, присутствуют два типа частиц округлой формы, состоящих преимущественно из меди или из железа. Поэтому представим 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:

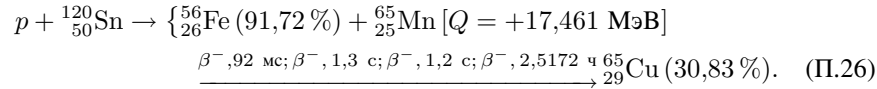




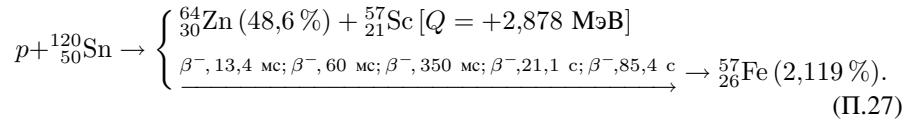
Как видно, в приведенных выше реакциях (П.16)–(П.25) могут образовываться следующие элементы: ${}^{63}_{29}\text{Cu}$, ${}^{65}_{29}\text{Cu}$, ${}^{48}_{22}\text{Ti}$, ${}^{50}_{22}\text{Ti}$, ${}^{51}_{23}\text{V}$, ${}^{52}_{24}\text{Cr}$, ${}^{53}_{24}\text{Cr}$, ${}^{54}_{24}\text{Cr}$,

$^{55}_{25}\text{Mn}$, $^{56}_{26}\text{Fe}$, $^{57}_{26}\text{Fe}$, $^{58}_{26}\text{Fe}$, $^{60}_{26}\text{Fe}$ и $^{62}_{28}\text{Ni}$ — при асимметричном делении олова в реакции подбарьерного слияния с протонами.

Аналогично можно записать реакцию образования наиболее распространенного в природе изотопа $^{56}_{26}\text{Fe}$ (91,72 %) при подбарьерном слиянии протонов с наиболее распространенным в природе ядром $^{120}_{50}\text{Sn}$:

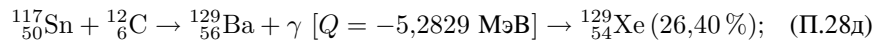
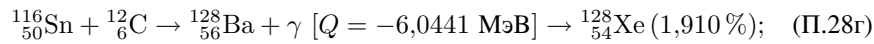
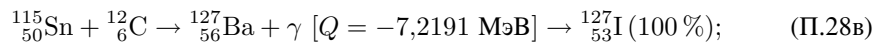
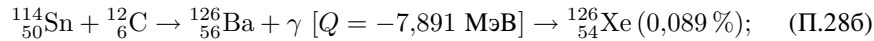


Приведем для примера реакцию с образованием $^{64}_{30}\text{Zn}$ (48,6 %):



Таким образом, можно написать непротиворечивые реакции 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 ННРС (см. [32, 33]).

Образование $^{56}_{56}\text{Ba}$ можно описать через реакции подбарьерного слияния изотопов $^{50}_{50}\text{Sn}$ с углеродом:



Другие реакции изотопов олова с углеродом не приводят к образованию стабильных изотопов бария. Как видно из выражений (П.28а)–(П.28к), только реакция (П.28к) имеет положительное значение Q , видимо, только она и возможна. Следовательно, измерение массового изотопного содержания бария могло бы дать ответ, какие реакции имели место при его образовании. Также при этих реакциях образуются ксенон (летучий газ) и йод.

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; JINR Preprint E15-2012-34. Dubna, 2012.
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.
5. *Didyk A. Yu. et al.* Changes of the Chemical Composition of Nuclear-Reaction Products Irradiated with 10-MeV γ -Quanta in Deuterium-Saturated Palladium // *J. Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques.* 2014. V. 8, No. 6. P. 1100–1112.
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., Wiśniewski R., Wilczynska-Kitowska T.* Changes of Surface Structure and Elemental Composition of Pd Rod and Collector of Nuclear Reaction Products Irradiated with 10-MeV γ -Quanta in Dense Deuterium Gas // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2013. V. 10, No. 7. P. 804–819; JINR Preprint P15-2013-15. Dubna, 2013.
8. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R., Wilczynska-Kitowska T.* Changes of Surface Structure and Elemental Composition of Components of Deuterium High-Pressure Chamber with Pd Rod Inside Irradiated with 10-MeV γ -Quanta in Dense Deuterium Gas // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2013. V. 10, No. 7. P. 820–832; Препринт ОИЯИ P15-2013-20. Дубна, 2013.
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.* 2013. Т. 10, № 4(181). С. 603–621; Препринт ОИЯИ P15-2012-63. Дубна, 2012.
10. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Properties of Hydrogen and Its Isotopes under High Pressure, and Technological Applications. Dubna: JINR, 2013. 320 p.
11. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П.* 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 // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* 2015 (направлено).

12. *Wiśniewski R., Didyk A. Yu., 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. Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2013. V. 7, No. 2. P. 239–247.
13. *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.
14. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р., Вилчинска-Китовска Т.* Синтез структур на основе углерода в ядерных реакциях под действием тормозных γ -квантов с пороговой энергией 10 МэВ в спектрально чистом гелии при давлении 1,1 кбар // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2015 (направлено).
15. *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 // *Journal of Physical Science and Application*. 2013. V. 3, No. 4. P. 209–217.
16. *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-P1–22001-P6.
17. *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.
18. *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, 2013; Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, №2(186). С. 278–292.
19. *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, 2013; Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, №3(187). С. 491–512.
20. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* Изменения структуры и элементного состава Pd-стержня и сборника продуктов реакций, облученных 10-МэВ тормозными γ -квантами в молекулярном водороде при давлении 2,5 кбар. Препринт ОИЯИ Р15-2013-80. Дубна, 2013;
Дидык А. Ю., Вишневецкий Р. Изменения структуры и элементного состава Pd-стержня и сборника продуктов реакций, облученных 10-МэВ тормозными γ -квантами в камере высокого давления молекулярного водорода при давлении 2,5 кбар // *Письма в ЭЧАЯ*. 2014. Т. 11, №4(188). С. 796–816.
21. *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; Письма в ЭЧАЯ. 2015 (направлено).
22. *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; Письма в ЭЧАЯ. 2015 (направлено).
 23. *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.
 24. *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.
 25. *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; Письма в ЭЧАЯ. 2015 (направлено).
 26. *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; Письма в ЭЧАЯ. 2015 (направлено).
 27. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Phenomenological Nuclear-Reaction Description in Deuterium-Saturated Palladium and Synthesized Structure in Dense Deuterium Gas under γ -Quanta Irradiation // Phys. Part. Nucl. Lett. 2013. V. 10, No. 3. P. 283–287; JINR Preprint E15-2012-35. Dubna, 2012.
 28. *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.
 29. *Ишханов Б. С., Капитонов И. М., Тутынь И. А.* Нуклеосинтез во Вселенной. М.: Либроком, 2009; <http://nuclphys.sinp.msu.ru/nuclsynt.html>.
 30. *Мухин К. Н.* Экспериментальная ядерная физика. Т. 1. Физика атомного ядра. М.: Энергоатомиздат, 1983. С. 590–593.
 31. Физические величины: Справочник / Под ред. Григорьева И. С., Мейлихова Е. З. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1234 с.
 32. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* Ядерные реакции с синтезом микрочастиц в ННРС с цилиндром из олова при давлении 3,5 кбар водорода под действием облучения тормозными γ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ. Препринт ОИЯИ Р15-2014-88. Дубна, 2014.
 33. *Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.* Ядерные реакции с синтезом микрочастиц в ННРС при давлении 3,5 кбар водорода с цилиндром из олова при облучении тормозными γ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ. Препринт ОИЯИ Р15-2014-89. Дубна, 2014.

34. Справочник нуклидов / Под ред. Голашвили Т. В., Чечева В. П., Бадикова С. А. М.: Издательский дом МЭИ, 2011. 461 с.
35. *Kálmán P., Keszthelyi T.* Solid State Internal Conversion // Phys. Rev. C. 2004. V. 69. 031606(R). P. 1–3.
36. *Kálmán P., Keszthelyi T.* Lattice Effect in Solid State Internal Conversion // Phys. Rev. C. 2009. V. 79. 031602(R). P. 1–4.
37. *Углов В. В.* Радиационные эффекты в твердых телах. Минск: БГУ, 2011. 207 с.
38. *Бете Г., Мориссон Ф.* Элементарная теория ядра. М.: Изд-во иностр. лит., 1958. 356 с.
39. dic.academic.ru/dic.nsf/enc_colier/5805/Солнце
40. *Bethe H. A.* Energy Production in Stars // Phys. Rev. 1939. V. 55, No. 1. P. 434–456.
41. *Gamov G.* Nuclear Energy Sources and Stellar Evolution // Phys. Rev. 1938. V. 53. P. 595–604.
42. *Moretto Luciano G.* Statistical Emission of Large Fragments: A General Theoretical Approach // Nucl. Phys. A. 1975. V. 247. P. 211–230.
43. *Sierk A. J.* Mass-Asymmetric Fission of Light Nuclei // Phys. Rev. 1985. V. 55, No. 6. P. 582–583.
44. *Sierk A. J.* Macroscopic Model of Rotating Nuclei // Phys. Rev. C. 1986. V. 33, No. 6. P. 2039–2052.

Получено 22 декабря 2014 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 30.04.2015.

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

Усл. печ. л. 1,12. Уч.-изд. л. 1,37. Тираж 225 экз. Заказ № 58533.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/