

P15-2014-38

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

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

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., Вишневецкий Р.

P15-2014-38

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

Газообразный гелий при начальном давлении около 1,1 кбар, находившийся в камере высокого давления гелия (HeHPC), был облучен тормозными γ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ в течение $1,0 \cdot 10^5$ с при токе электронного пучка 22–24 мкА. При вскрытии HeHPC остаточное давление гелия оказалось равным 426 бар. Внутри HeHPC были обнаружены синтезированные фольги черного цвета и другие множественные объекты, находившиеся на внутренних поверхностях реакционной камеры, состоящей из меди высокой чистоты (99,99), входного окна γ -квантов из бериллиевой бронзы и медного сборника продуктов ядерных и химических реакций. Исследования с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и рентгеновского микроэлементного зондового анализа (РМЗА) позволили установить, что фольги состоят преимущественно из углерода и в меньших количествах из других элементов от углерода до железа. Предложено объяснение обнаруженных элементов и аномалий на основе ядерных реакций слияния гелия под действием γ -квантов по аналогии с реакциями на звездах в астрофизике. Разработанный подход хорошо согласуется с циклом исследований авторов при воздействии γ -квантов на плотные газы водорода и дейтерия в присутствии в реакционной камере металлов или при их отсутствии.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2014

Didyk A. Yu., Wiśniewski R.

P15-2014-38

Properties of Carbon-Based Structures Synthesized in Nuclear Reactions under Braking γ -Quanta Irradiation with 10 MeV Threshold Energy at 1.1 kbar Helium Gas Pressure

The helium gas at 1.1 kbar initial pressure inside a helium high-pressure chamber (HeHPC) was irradiated by braking γ -quanta with 10 MeV threshold energy during $1.0 \cdot 10^5$ s at the electron beam current 22–24 μ A. The helium gas pressure before opening of the HeHPC was found to be 426 bar. The synthesized black foils and other objects were observed inside the HeHPC and on the inner surfaces of the reactive chamber consisting of high purity copper (99.99), a beryllium bronze entrance window and a copper collector of chemical and nuclear reaction products. Elemental analysis using scanning electronic microscopy (SEM) and microprobe roentgen analysis (MPRA) allowed one to establish that the observed foils consist predominantly of carbon and with smaller quantities of other elements from carbon to iron. The explanation of the observed phenomena and anomalies is given on the basis of helium fusion nuclear reactions by analogy with nuclear reactions taking place in stars. The developed approach agrees well with the series of studies carried out by authors at γ -quanta influence on dense hydrogen and deuterium gases with or without presence of metals in the reactive chamber.

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

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

ВВЕДЕНИЕ

Исследования элементного состава синтезированных частиц и объектов, а также структуры поверхностей элементов камеры высокого давления дейтерия (DНРС) были выполнены на образцах ряда металлов и сплавов Al, V, Cu, Pd, Sn, Re, YМn₂ и нержавеющей стали в виде стержней и проволок, находящихся в атмосфере газообразного молекулярного дейтерия при высоком давлении под действием тормозных γ -квантов с энергиями 10 МэВ [1–8] и 23 МэВ [8, 9, 11–14]. Аналогичные исследования для изучения возможностей протекания ядерных реакций были проведены в камерах высокого давления водорода (HНРС) с наличием внутри Pd-стержней [15, 18, 19] и с одним водородом без металлических образцов внутри [16, 17] при облучении 10-МэВ тормозными γ -квантами. Обсуждения феноменологических модельных подходов с ядерными реакциями деления в капельной модели ядра и слияния ядер представлены в работах [7, 10, 15, 16, 19, 20].

Цель настоящей работы — исследование процессов по образованию новых элементов и синтезированных из них структур, которые отсутствовали в материале камеры высокого давления гелия (HeНРС).

1. ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ОБЛУЧЕНИЯ γ -КВАНТАМИ И ПАРАМЕТРОВ HeНРС

На рис. 1 представлена схема *модифицированной камеры высокого давления*, заполненной гелием (или сокращенно HeНРС) на момент облучения γ -квантами при давлении 1092 кбар. Гелий особой спектральной чистоты находился внутри камеры (99,999). При этом наполнение внутренней HeНРС гелием осуществлялось трехкратным повторением операции: заполнение камеры объемом менее 1 см³ гелием до давления 150 бар, сброс давления до атмосферного и опять заполнение гелием до 150 бар. При этом степень очистки от газа из атмосферы составляла $(1/150)^3 \simeq 3 \cdot 10^{-7}$.

Модификация HeHPC заключалась в двух важных изменениях: 1) уплотнение из витона в месте соединения входного окна гамма-квантов (рис. 1, поз. 4) и камеры высокого давления из CuVe_2 (рис. 1, поз. 6) было заменено на уплотнение металл по металлу; 2) реакционная камера (рис. 1, поз. 8) и сборник продуктов реакций (рис. 1, поз. 9) были изготовлены из меди высокой чистоты (99,99). Это позволило ограничить присутствие химических элементов вблизи и внутри реакционной камеры только медью и бериллием во входном окне.

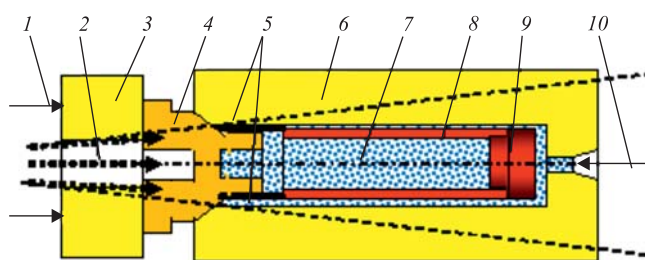


Рис. 1. Элементы камеры высокого давления гелия (HeHPC), использованные при облучении гамма-квантами: 1 — винтовое прижимное уплотнение (конус $60^\circ/58^\circ$), которое не показано на этом рисунке; 2 — поток гамма-квантов с проходным сечением в 6 мм; 3 — входное окно из $\text{Cu}_{1-x}\text{Ve}_x$, в которое вставляется прижимной винт; 4 — входное окно гамма-квантов; 5 — место присоединения входного окна к реакционной камере с углеродными фольгами; 6 — камера высокого давления из $\text{Cu}_{0,98-0,96}\text{Ve}_{0,2-0,4}$ с внешним защитным стальным цилиндром (не показан на рисунке); 7 — гелий (исходное давление 2 кбар, конечное 1 кбар); 8 — медная реакционная камера из чистой (99,99) меди; 9 — медный сборник продуктов реакции, закрывающий реакционную камеру; 10 — устройство для загрузки-разгрузки газа и измерения его давления при контроле и в процессе облучения

Исходное давление в HeHPC перед облучением с использованием внутреннего тензора-датчика (см. рис. 1, поз. 10) и измерительного модуля (Model P3 Strain indicator and recorder) оказалось равным 1092 бар, хотя исходное давление гелия при загрузке составляло ~ 2 кбар и держалось около одного месяца без изменений. При давлении гелия около 1,1 кбар его атомную плотность можно оценить как $1,5 \cdot 10^{22}$ ат./см³ [10].

Облучение HeHPC было проведено в течение 27 ч 51 мин, или $1,02 \cdot 10^5$ с, на ускорителе электронов МТ-25 Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова. Энергия электронного пучка составляла 10 МэВ при токе пучка электронов от 21 до 23 мкА. Тормозные γ -кванты непрерывного спектра с граничной энергией примерно 10 МэВ были получены с использованием тормозной мишени в виде вольфрамовой фольги толщиной 2,5 мм и алюми-

евого поглотителя электронного пучка толщиной 25 мм. При облучении температура внутри внешнего защитного стального цилиндра (оболочки) HeHPC (рис. 1, поз. б) составляла около 60 °С.

Давление внутри камеры в начале облучения выросло от 1092 до 1242 бар, т. е. на 150 бар. При вскрытии камеры, а это наиболее объективное и точное измерение, давление в ней оказалось равным 426 бар. Следовательно, давление упало на 666 бар.

После вскрытия HeHPC в области внутренней ее части (рис. 1, поз. 5) были обнаружены маслянистые (см. пояснения ниже) округлой формы черные фольги. Эти черные фольги значительных размеров (см. рис. 2–3 ниже) ориентировочно состоят преимущественно из углерода. Когда фольги были выложены на специальную чистую рулонного типа бумагу (кальку), в месте их расположения остались маслянистые следы. Этот факт свидетельствует о том, что черные углеродные фольги, *возможно, содержат жидкие масла в виде углеводородов (?)*.

2. ОПТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТОРМОЗНЫХ γ -КВАНТОВ ЧЕРНЫХ МАСЛЯНИСТЫХ ФОЛЬГ

При вскрытии HeHPC в месте присоединения входного окна к реакционной камере (рис. 1, поз. 5) обнаружены фольги черного цвета с армирующими вставками внутри, часть которых торчала из фольги в виде протяженных стержней, постоянной толщины, светлые. Фольги были помещены на чистую

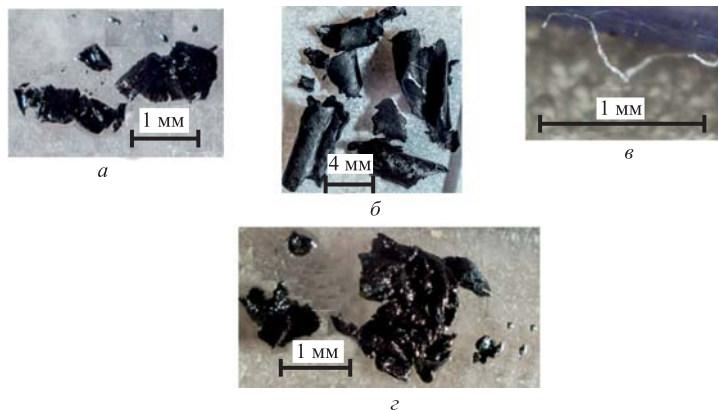


Рис. 2. Фотографии трех групп черных фольг (а, б, з) и протяженной светлой «нитки» (з), обнаруженных в месте присоединения входного окна к реакционной камере (рис. 1, поз. 5)

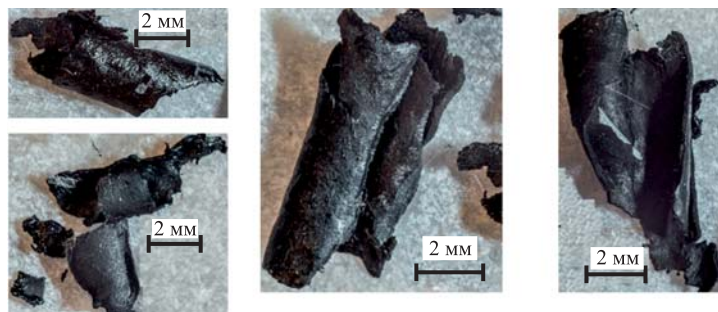


Рис. 3. Фотографии тонких цилиндрической формы фольг черного цвета, которые представлены в комплексе на рис. 2, б, в увеличенном масштабе

бумагу (кальку). В месте нахождения черных фольг калька пропиталась жидкими выделениями из фольг. По внешнему виду эти жидкие выделения на кальке напоминали что-то вроде синтетического масла или жидких углеводов. На рис. 2 представлены фотографии множества таких черных округлых фольг, которые приобрели данную форму ввиду цилиндрической симметрии входа в реакционную камеру (рис. 1, поз. 5), полученные с использованием специального приспособления для микросъемки на фотоаппарате.

Отметим сразу, что при изучении синтезированных частиц ввиду их относительно малых размеров иногда не получается их сохранить для дальнейших исследований. В частности, обнаруженную протяженную нить, светлую, длиной более 1 мм (рис. 2, в), исследовать больше не удалось.

Исследования элементного состава черных фольг методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и рентгеновского микроэлементного зондового анализа (РМЗА) будут представлены в следующем разделе. Комментарий, сделанный после рис. 2, относится также к фольгам на рис. 3 и далее.

3. СЭМ- И РМЗА-ИССЛЕДОВАНИЯ (В НИИЯФ МГУ) ТОНКИХ ЧЕРНЫХ ФОЛЬГ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБЛУЧЕНИЯ HeHPC γ -КВАНТАМИ

Изучение структуры и элементного состава всех компонентов HeHPC, которые имели контакт с плотным гелием, а именно: разрезанных вдоль осей цилиндрической симметрии двух внутренних и внешних поверхностей входного окна из бериллиевой бронзы, двух внутренних поверхностей медной втулки, в которой преимущественно проходили ядерные и химические реакции, медного сборника продуктов реакций — были проведены в двух независимых аналитических центрах (АЦ): в НИИЯФ им. Д. В. Скобельцына МГУ им. М. В. Ломоносова (АЦ-I) и ФГУП НИИ ПМТ (АЦ-II). Большая часть ре-

зультатов этих исследований ввиду значительного их количества будет представлена в следующих работах. Как было отмечено в предыдущем разделе, при вскрытии НенРС в месте присоединения входного окна к реакционной камере (см. рис. 1, поз. 5) были обнаружены маслянистые фольги черного цвета с армирующими одинаковой толщины стержнями малого диаметра, торчащими из них или расположенными вдоль поверхностей черных фольг, т. е. внутри них.

На рис. 4 представлены СЭМ-изображения одной из таких черных непрозрачных пленок в виде фольги с длиной в несколько миллиметров во вторичных электронах (а) и в отраженных электронах (б).

В отраженных электронах более светлые изображения соответствуют более тяжелым химическим элементам (с большим порядковым номером элемента). На рис. 4, б отчетливо видно, что пленка как бы армирована протяженными светлыми стержнями различной длины и вкраплениями светлых частиц относительно малых размеров по сравнению с масштабом в 1 мм.

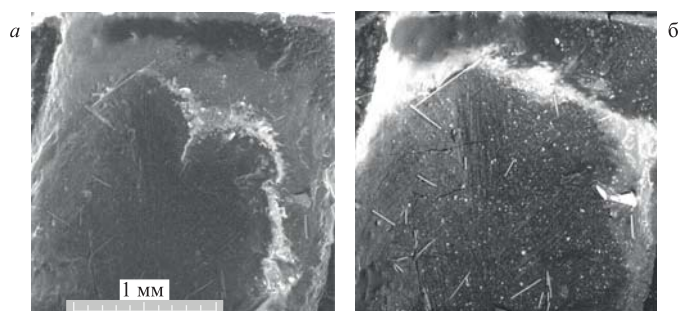


Рис. 4. СЭМ-изображения черной непрозрачной пленки во вторичных электронах (а) и в отраженных электронах (б)

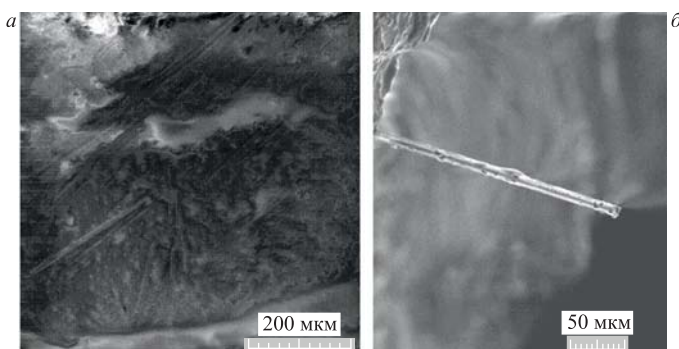


Рис. 5. СЭМ-изображения двух участков черной пленки

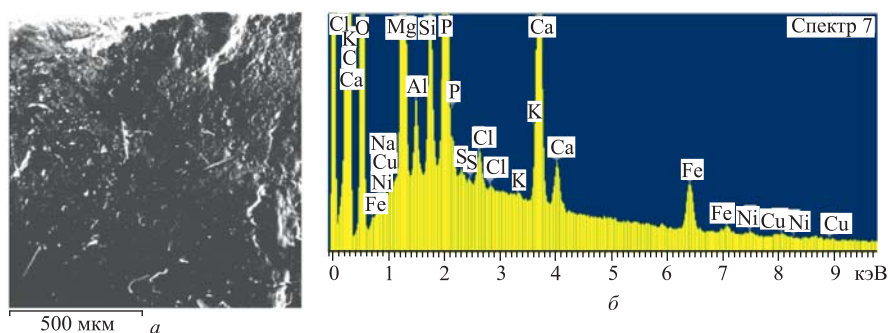


Рис. 6. СЭМ-изображение поверхности участка черной фольги, со всей площади которого был сделан РМЗА (а), и соответствующий ХСРИ (б)

На рис.5 представлены два СЭМ-изображения участков другой черной пленки: с большим увеличением (а) и отчетливо видного одного из армирующих длинных стержней (б).

На рис. 6 приведены: СЭМ-изображение участка поверхности одной из черных фольг (см. рис. 2 и 3) со светлыми вкраплениями и стержнями, со всей площади которого был сделан РМЗА (а), и соответствующий характеристический спектр рентгеновского излучения (ХСРИ) (б); в табл. 1 см. элементный состав.

Отметим, что черные фольги состоят преимущественно из углерода, при этом его концентрация более 70 ат. %, а толщина фольг относительно не-

Таблица 1. Элементный состав поверхности черной фольги (см. рис. 6, а, б)

Элемент	Z	Серия	C, вес. %	C, ат. %
Кислород	8	K	56,08	69,07
Натрий	11	K	0,30	0,26
Магний	12	K	20,53	16,64
Алюминий	13	K	1,51	1,11
Кремний	14	K	3,16	2,22
Фосфор	15	K	12,33	7,85
Сера	16	K	0,14	0,08
Хлор	17	K	0,52	0,29
Калий	19	K	0,04	0,02
Кальций	20	K	4,11	2,02
Железо	25	K	1,10	0,39
Никель	28	K	0,09	0,03
Медь	29	K	0,09	0,03

большая, поэтому, чтобы оценить концентрации других образовавшихся элементов в ряде измеренных ХСРИ, в методе РМЗА при их обработке углерод искусственно удалялся из расчетов, т. е. его концентрация полагалась равной нулю. Как видно из табл. 1, в фольге после удаления углерода следующими по концентрациям находятся: кислород (69,07 ат. %), магний (16,64 ат. %), алюминий (1,11 ат. %), кремний (2,22 ат. %), фосфор (7,85 ат. %), кальций (2,02 ат. %) и железо (1,10 вес. %), присутствуют также в меньших количествах натрий, сера, хлор, калий, никель и медь. Естественно, все эти атомные концентрации носят относительный характер.

На рис. 7 представлено СЭМ-изображение участка поверхности одной из черных фольг со светлыми вкраплениями и стержнями, вдоль отмеченной полосы на котором был сделан РМЗА (а), а также относительные концентрации элементов вдоль этой полосы (б). Длина полосы сканирования РМЗА составляет около 350 мкм. Из спектров на рис. 7, б можно сделать вывод, что черная пленка-фольга имеет сильно неоднородный характер на использованном масштабе измерений. Поэтому и наблюдается такая неоднородность в распределении элементов. Можно сделать вывод, что при сканировании встречаются частицы, которые состоят преимущественно из углерода. А мелкие структуры, одна из которых была в измеренной полосе исследована (см. рис. 7, а), содержат: углерод (до 500 отн. ед.), кислород (до 90 отн. ед.), алюминий (до 170 отн. ед.), кремний (до 550 отн. ед.), фосфор (до 280 отн. ед.), кальций (до 360 отн. ед.) и хлор (до 13 отн. ед.).

На рис. 8 приведено СЭМ-изображение участка поверхности одной из черных фольг с длинным стержнем, поперек которого по полосе сканирования был сделан РМЗА (а), а также относительные концентрации элементов

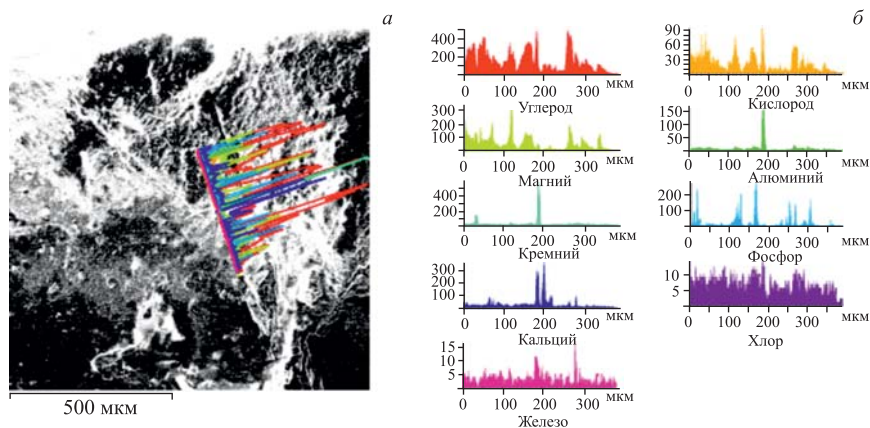


Рис. 7. СЭМ-изображение участка поверхности черной фольги, вдоль отмеченной полосы на котором был сделан РМЗА (а), и концентрации элементов (б)

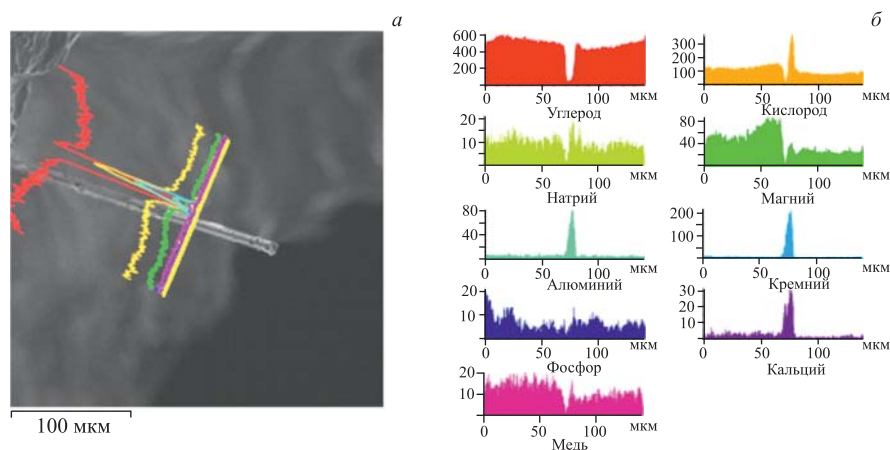


Рис. 8. СЭМ-изображение участка поверхности черной фольги, вдоль отмеченной полосы на котором был сделан РМЗА (а), и концентрации элементов (б)

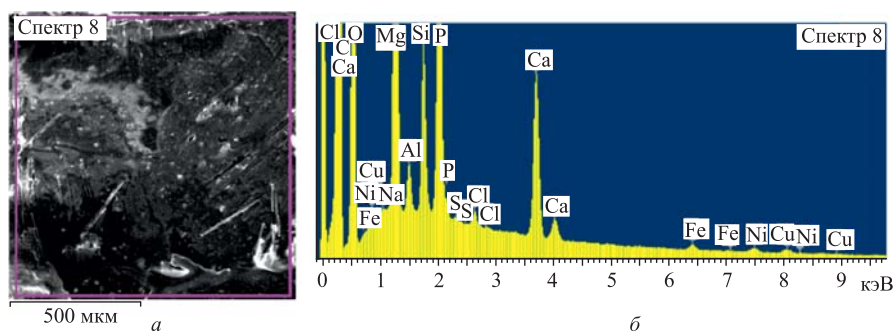


Рис. 9. СЭМ-изображение участка поверхности черной пленки, со всей площади которого был сделан РМЗА (а), и соответствующий ХСРП (б)

вдоль этой полосы (б). Из спектров на рис. 8, б можно сделать два вывода:

- 1) черная пленка-фольга состоит преимущественно из углерода (до 500–600 отн. ед.), кислорода (до 130 отн. ед.), натрия (до 10 отн. ед.), магния (до 80–30 отн. ед.), фосфора (до 5–20 отн. ед.) и меди (до 10–20 отн. ед.);
- 2) длинные стержни, один из которых был в измеренной полосе исследован (см. рис. 18, а), состоят из: кислорода (до 350 отн. ед.), алюминия (до 80 отн. ед.), кремния (до 200 отн. ед.) и кальция (до 30 отн. ед.).

На рис. 9 представлены: СЭМ-изображение участка поверхности одной из черных фольг со светлыми вкраплениями и стержнями, со всей выделенной

Таблица 2. Элементный состав участка поверхности черной фольги (см. рис.9, а, б)

Элемент	Z	Серия	C, вес. %	C, ат. %
Кислород	8	К	59,25	71,17
Натрий	11	К	0,14	0,12
Магний	12	К	21,90	17,31
Алюминий	13	К	1,47	1,05
Кремний	14	К	4,04	2,76
Фосфор	15	К	9,34	5,80
Сера	16	К	0,08	0,05
Хлор	17	К	0,31	0,17
Кальций	20	К	2,89	1,39
Железо	25	К	0,18	0,06
Никель	28	К	0,18	0,06
Медь	29	К	0,22	0,07

площади которого был сделан РМЗА (а), и соответствующий ХСРИ (б), а в табл. 2 дан элементный состав.

Как видно из сравнения рис. 6, а, б и табл. 1, а также рис. 9, а, б и табл. 2, измеренные значения элементного состава двух участков черной фольги без учета углерода, из которого в основном она и состоит, очень близки. Углерод специально исключен из расчета концентраций с тем, чтобы лучше оценить концентрации остальных элементов, которые в малых количествах все же присутствуют в черной фольге.

Для сравнения приведем здесь СЭМ- и РМЗА-исследования черных синтезированных фольг, выполненные для убедительности в другом независимом центре аналитических исследований, а именно в ФГБНУ «НИИ ПМТ».

4. СЭМ- И РМЗА-ИССЛЕДОВАНИЯ (В ФГБНУ «НИИ ПМТ») ТОНКИХ ЧЕРНЫХ ФОЛЬГ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБЛУЧЕНИЯ ^{60}Co γ -КВАНТАМИ

Для статистики в исследованиях в этом разделе был использован другой набор фольг, которые были также обнаружены при вскрытии ^{60}Co . На рис. 10 приведены СЭМ-изображения крупной фольги и нескольких ее участков с различным увеличением.

Как и в разд. 3, на участках изучаемой фольги присутствуют линейные протяженные стержни, которые расположены как на поверхности самой фольги, так и торчат из нее в произвольных направлениях. На рис. 11, а и 12, а представлены СЭМ-изображения двух участков этой крупной фольги, а

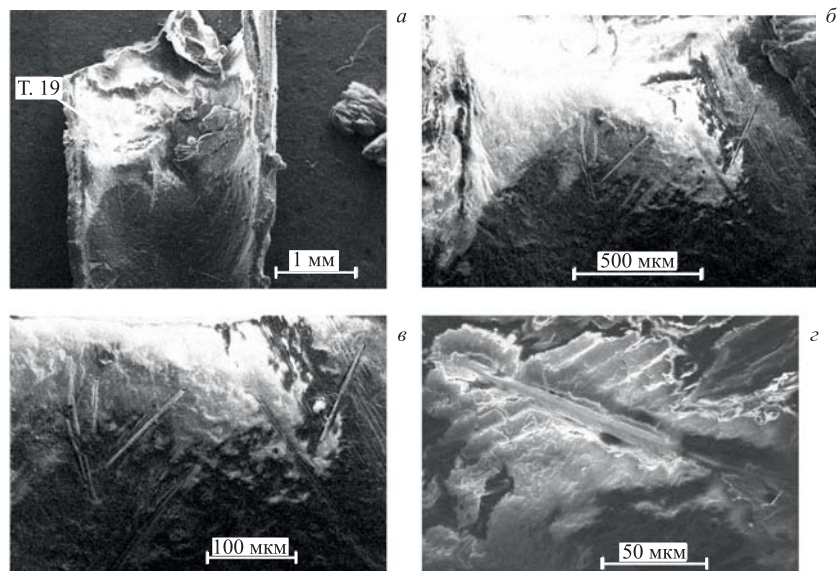


Рис. 10. СЭМ-изображения крупной фольги (а) и нескольких ее участков с различным увеличением (б–г)

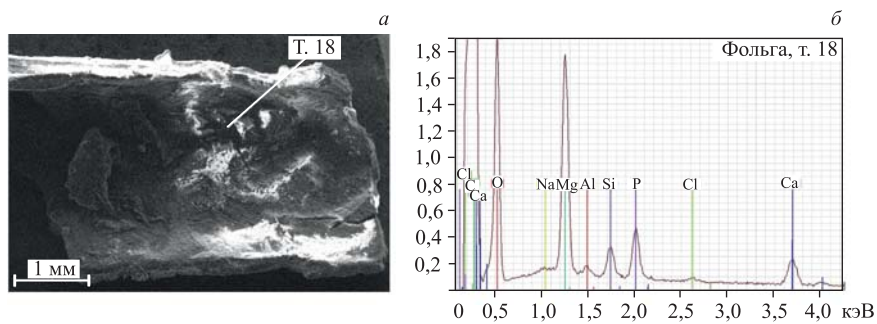


Рис. 11. СЭМ-изображение участка черной фольги (а) и ХСРИ в т. 18 (б)

на рис. 11, б и 12, б приведены ХСРИ, измеренные в т. 18 и 19 соответственно. В табл. 3 даны концентрации элементов в этих двух точках. Видно, что фольга на рис. 10–12 содержит много углерода и кислорода, значительное количество азота, в связанном состоянии с присутствием фтора и почти все элементы вплоть до кальция и железа.

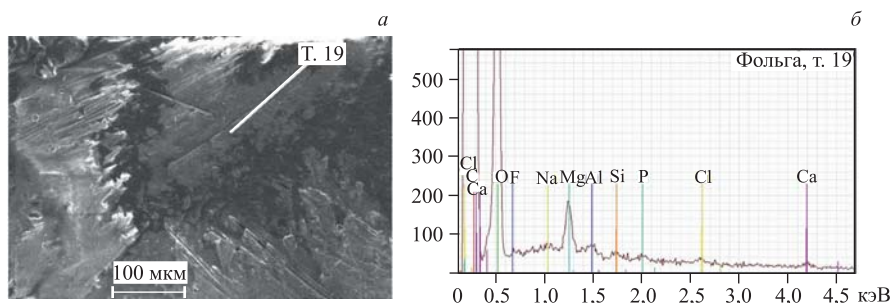


Рис. 12. СЭМ-изображение участка черной фольги (а) и ХСРИ в т. 19 (б)

Таблица 3. Элементный состав фольг на рис. 11, а и 12, а в т. 18 и 19

Элемент	Z	Серия	$(C \pm \Delta C)$, вес. %	C, ат. %	$(C \pm \Delta C)$, вес. %	C, ат. %
			Т. 18		Т. 19	
Углерод	6	К	59,10±6,76	66,38	60,65±7,13	67,04
Азот	7	К	5,91±1,17	5,69	5,51±1,32	5,22
Кислород	8	К	30,14±3,84	25,42	32,59±4,41	27,05
Фтор	9	К	—	—	0,37±0,17	0,26
Натрий	11	К	0,42±0,06	0,25	0,03±0,03	0,02
Магний	12	К	3,02±0,20	1,68	0,44±0,05	0,24
Алюминий	13	К	0,18±0,04	0,09	0,11±0,03	0,05
Кремний	14	К	0,25±0,04	0,12	0,07±0,03	0,04
Фосфор	15	К	0,48±0,05	0,21	0,05±0,03	0,02
Хлор	17	К	0,04±0,03	0,01	0,07±0,03	0,03
Кальций	20	К	0,44±0,04	0,15	0,09±0,03	0,03
Железо	26	К	0,03±0,03	0,01	—	—

На рис. 13 показаны четыре черные частицы сложной формы. На рис. 14 представлено СЭМ-изображение пяти частиц (а), а также ХСРИ в т. 20 и 21 (б, в). На рис. 15 даны: СЭМ-изображение двух частиц (а) и ХСРИ в т. 22 (б). В табл. 4 приведены концентрации элементов в т. 20–22.

Из таблицы видно, что в трех частицах, в которых были проведены РМЗА, присутствуют в больших количествах углерод и кислород. Следует

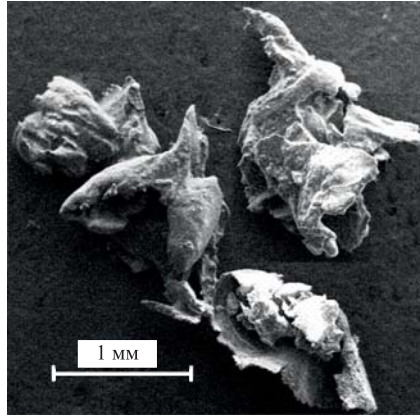


Рис. 13. СЭМ-изображение четырех черных частиц

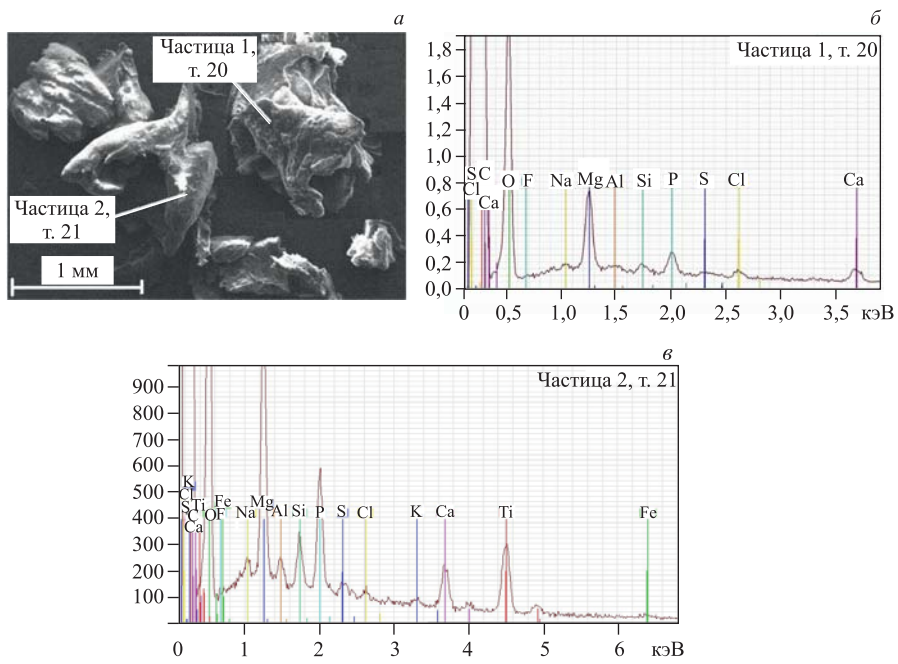


Рис. 14. СЭМ-изображение пяти частиц (а) и ХСРИ (б, в), полученные в т. 20 и 21

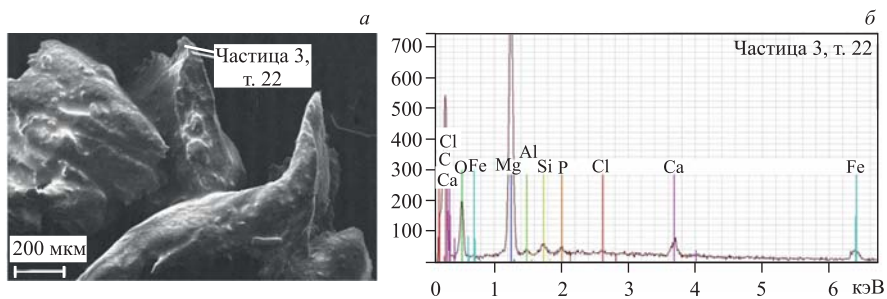


Рис. 15. СЭМ-изображение двух частиц (а) и ХСРП (б), полученный в т. 22

Таблица 4. Элементный состав частиц на рис. 14, а и 15, а в т. 20–22

Элемент	Z	Серия	$(C \pm \Delta C)$,	C,	$(C \pm \Delta C)$,	C,	$(C \pm \Delta C)$,	C,
			вес. %	ат. %	вес. %	ат. %	вес. %	ат. %
			Т. 20		Т. 21		Т. 22	
Углерод	6	К	58,2±6,8	65,9	52,79±6,31	62,14	51,04±5,15	62,10
Азот	7	К	—	—	—	—	4,88±1,32	5,09
Кислород	8	К	37,6±4,8	32,0	37,47±4,77	33,11	24,30±2,97	22,20
Фтор	9	К	0,53±0,20	0,38	0,73±0,23	0,55	—	—
Натрий	11	К	0,18±0,04	0,10	0,77±0,08	0,47	0,05±0,03	0,03
Магний	12	К	1,35±0,10	0,75	3,08±0,20	1,79	14,61±0,57	8,78
Алюминий	13	К	0,10±0,03	0,05	0,36±0,05	0,19	0,29±0,04	0,15
Кремний	14	К	0,22±0,04	0,11	0,41±0,04	0,20	0,59±0,05	0,31
Фосфор	15	К	0,60±0,05	0,26	1,09±0,07	0,50	0,38±0,04	0,18
Сера	16	К	0,15±0,03	0,06	0,13±0,03	0,06	0,14±0,03	0,06
Хлор	17	К	0,21±0,04	0,08	0,08±0,03	0,03	0,09±0,03	0,04
Калий	19	К	0,05±0,03	0,02	0,08±0,03	0,03	—	—
Кальций	20	К	0,60±0,05	0,20	0,71±0,05	0,25	1,15±0,06	0,42
Титан	22	К	—	—	2,17±0,09	0,64	—	—
Железо	26	К	0,08±0,03	0,02	0,12±0,03	0,03	2,13±0,09	0,56
Никель	28	К	0,02±0,03	0,00	—	—	—	—
Медь	29	К	0,05±0,03	0,01	—	—	0,37±0,05	0,08

также отметить значительное количество азота (см. табл. 3) и особенно магния (см. табл. 1–3 и спектры на рис. 7, б и 8, б). Табл. 3 и 4 свидетельствуют о наличии фтора.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В работе изучены синтезированные крупные черные углеродные фольги с протяженными стержнями, расположенными как вдоль поверхностей фольг (как бы внутри них), так и торчащими наружу, и более мелкие частицы (см. фотографии на рис. 2, 3, а также СЭМ-изображения на рис. 4, 5, 6, а, 7, а, 8, а, 9, а, и 10, 11, а, 12, а). Как видно из рис. 2, а и 3, наиболее крупные куски фольг представляют собой как бы отделившиеся от стенок камеры высокого давления (рис. 1, поз. 5 и 6) части цилиндра (см. рис. 3) с диаметром, равным диаметру камеры высокого давления.

Сделаем оценку количества гелия, которое, по-видимому, было израсходовано при синтезе новых элементов: исходное давление гелия составляло 1092 бар, а конечное — примерно 426 бар. Будем считать, что плотный гелий по массовой и атомной плотности близок к молекулярному дейтерию при высоком давлении. Выбираем соответствующие значения плотностей для дейтерия при вышеуказанных давлениях (см. [10]): $\rho_{\text{He}}(P = 1 \text{ кбар}) \approx 0,099 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$; $n_{\text{He}}(P = 1 \text{ кбар}) \approx 1,36 \cdot 10^{22} \text{ ат}\cdot\text{He}\cdot\text{см}^{-3}$; $\rho_{\text{He}}(P = 0,5 \text{ кбар}) \approx 0,062 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$; $n_{\text{He}}(P = 0,5 \text{ кбар}) \approx 0,82 \cdot 10^{22} \text{ ат}\cdot\text{He}\cdot\text{см}^{-3}$. Внутренние размеры реакционной камеры (см. рис. 1, поз. 8): 15 мм — длина, 8 мм — диаметр, ее внутренний объем составляет $V_{\text{He}} = 0,75 \text{ см}^3$, следовательно, предполагая, что десорбции гелия при облучении не происходило, а изменение массы, давления и плотности гелия обусловлено только ядерными реакциями слияния, и считая, что при этом образуется преимущественно углерод (см. [21–25] и ниже), можно получить, что общая масса образовавшегося углерода (и других элементов) составляет значительную величину: $\Delta m_{\text{He}} \propto \{\rho_{\text{He}}(1 \text{ кбар}) - \rho_{\text{He}}(0,5 \text{ кбар})\} \cdot V_{\text{He}} = 0,0277 \text{ г}$. Вычисляя эту же величину по изменению числа атомов гелия и массе атома гелия $M_{\text{He}} = 6,640999 \cdot 10^{-24} \text{ г}$, находим аналогично: $\Delta m_{\text{He}} \propto \{n_{\text{He}}(1 \text{ кбар}) - n_{\text{He}}(0,5 \text{ кбар})\} \cdot M_{\text{He}} \cdot V_{\text{He}} = 0,0269 \text{ г}$. Взвешивания черных фольг не проводилось. Тем не менее можно заключить, что массовое количество гелия $\Delta m_{\text{He}} \approx 0,027 \text{ г}$ вполне сопоставимо с общим количеством углеродных фольг и других объектов, включая углеродное покрытие поверхности медной реакционной камеры или иначе — втулки (см. рис. 1, поз. 8) [28].

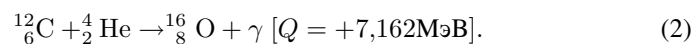
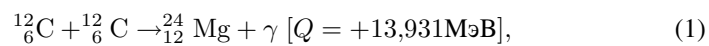
Принимая во внимание все результаты по оценкам концентраций химических элементов, полученные при исследовании углеродных фольг (рис. 2, 3, 10 и 13, 14, а, 15, а), выделим (см. табл. 1–4) здесь наиболее важные для объяснения обнаруженных аномалий. Концентрации углерода составляют: 67,04 ат. % и 62,10 ат. %, при этом присутствует в значительных количествах азот 5,22 ат. % и 5,09 ат. % (см. табл. 3 и 4). Особо следует отметить значительные концентрации магния: 16,64 ат. % — табл. 1, 17,31 ат. % — табл. 2, 1,68 и 0,24 ат. % — табл. 3, 0,75, 1,79 и 8,78 ат. % — табл. 4. В табл. 1, 2 оценки

концентраций элементов получены без учета углерода: он был исключен из расчетов с тем, чтобы оценить концентрации элементов в диапазоне азот–железо, которые имеют низкие значения.

В работе [28] представлены дополнительные детальные экспериментальные результаты по измерению концентрации элементов в обнаруженных объектах на: а) двух внутренних и внешних поверхностях входного окна из бериллиевой бронзы; б) двух внутренних поверхностях медной втулки, в которой преимущественно проходили ядерные и химические реакции; в) поверхности медного сборника продуктов реакций (см. рис. 1, поз. 4, 5, 8 и 9 соответственно). Такое разделение данных из одного эксперимента на две независимых публикации обусловлено большим объемом и важностью полученных результатов, которые необходимо представить для достоверности. Было показано, что, как и в настоящей работе, основным элементом оказался углерод с присутствием более тяжелых элементов массами от углерода до железа, никеля и меди. Особо отметим, что практически все внутренние поверхности компонентов HeHPC а)–в) покрылись заметным слоем углерода, а химический элементный состав обнаруженных структур примерно совпадает с данными, приведенными в этой работе (см. табл. 1–4).

Объяснение обнаруженных эффектов может быть сделано на основе реакций синтеза ядер гелия, «нагретых» γ -квантами (с энергией 10 МэВ) за счет упругого рассеяния $\gamma + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He}^* + \gamma'$, и других эффектов при рассеянии γ -квантов на атомах гелия (см. [15–19]). Как известно [21], реакция ${}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C}^*$ может идти только через короткоживущее ядро ${}^8_2\text{Be}$, которое имеет время жизни $\tau \approx 10^{-16}$ с. Тем не менее в плотном гелии это ядро может успеть захватить третье ядро гелия.

Наряду с большим количеством образовавшегося углерода, в основном в виде фольг (рис. 2 и 3), найдены значительные количества кислорода и магния. Эти химические элементы могли быть образованы в подбарьерных реакциях синтеза [23, 24] типа:



Детали возможных процессов описаны в приложении, в котором представлены некоторые реакции в плотном гелии, происходящие при «выгорании» гелия в астрофизике (см., например, [21, 22] и классические работы [23–25]). Хорошо известно, что вероятности ряда основных ядерных реакций синтеза, описанных в приложении, крайне малы и часть из них в земных условиях никогда не была реализована.

**ПРИЛОЖЕНИЕ.
РЕАКЦИИ, ВОЗМОЖНО, ПРИВОДЯЩИЕ К ОБНАРУЖЕННЫМ
АНОМАЛИЯМ**

В данной работе плотный гелий при давлении 1,1 кбар внутри HeHPC был облучен тормозными γ -квантами с пороговой энергией около 10 МэВ. Оценочные значения атомной и массовой плотностей гелия приведены в разделе «Заключение и выводы».

Одним из механизмов передачи энергии ядрам гелия может служить упругое рассеяние (см., например, [15, 26]). Выражение для максимальной энергии, которую γ -квант способен передать атомам гелия, имеет вид [15, 26]

$$T_{\text{He}}^{\text{max}} = E_{\gamma} \left(1 + \frac{M_{\text{He}} c^2}{2 E_{\gamma}} \right), \quad (\text{П.1})$$

где M — масса атома гелия; E_{γ} — энергия γ -кванта. Для атомов гелия максимальные энергии, переданные им γ -квантами (с энергиями $E_{\gamma} = 10$ и 25 МэВ), составляют

$$T_{\text{He}}^{\text{max}}(10 \text{ МэВ}) = 52,97 \text{ кэВ}, \quad T_{\text{He}}^{\text{max}}(25 \text{ МэВ}) = 328,44 \text{ кэВ}. \quad (\text{П.2})$$

Сечения прямого рассеяния γ -квантов на ядрах малы (см., например, [26, 27]). Но при взаимодействии γ -квантов с атомами мишени происходят непрямые процессы, такие как фотоэффект, эффект Комптона и рождение $e^- - e^+$ -пар [15, 26], в результате которых образуются высокоэнергетические электроны и позитроны, способные «нагревать» атомы газообразной среды.

Как известно [21, 22], температура в центре Солнца $\bar{T} \approx 14 \cdot 10^6 \text{ К}$, а оценочная плотность солнечной плазмы в центре $\rho \approx 100 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. Тогда средняя кинетическая энергия гелия в центре Солнца

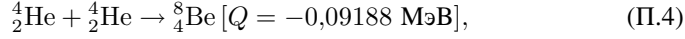
$$\bar{E}_{\text{He}} = \frac{3}{2} k \bar{T} = 1,81 \text{ кэВ}. \quad (\text{П.3})$$

Высота кулоновского барьера реакции ${}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$ составляет примерно $V_{\text{к}} \approx 1,26 \text{ МэВ}$, поэтому энерговыделение из Солнца осуществляется за счет перекрытия максвелловского распределения энергетического спектра гелиевой плазмы и возрастающего с увеличением энергии сечения подбарьерного слияния в реакции ${}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$ (см. [22–24]).

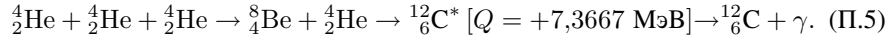
Как видно, максимальная энергия, переданная ядрам гелия в случае облучения гелиевой мишени γ -квантами с энергиями 10 и 25 МэВ (П.2), значительно превышает среднюю энергию гелия в центре Солнца (П.3).

Принято считать [21], что реакции гелиевого цикла («горение» гелия) идут в звездах, начиная с температур $T > 200 \cdot 10^6 \text{ К}$ (т. е. более 25,85 кэВ), по реакции Солпитера через промежуточное короткоживущее ядро ${}^8_4\text{Be}$ со

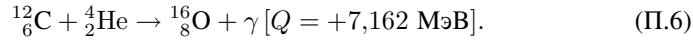
временем жизни $\tau \approx 10^{-16}$ с. Плотность в центральной части звезды (ядра) достигает 10^4-10^5 г·см⁻³. Основная реакция горения гелия — это



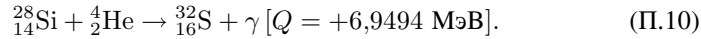
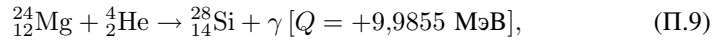
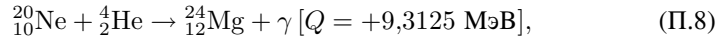
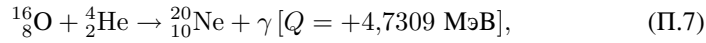
но из-за высокой плотности ядер гелия ${}^8_4\text{Be}$ успевает взаимодействовать с третьим ядром гелия по реакции



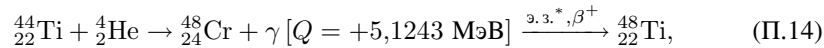
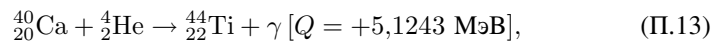
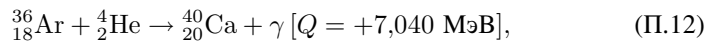
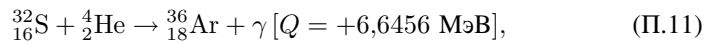
На скорость реакции ${}^8_4\text{Be} + {}^4_2\text{He}$ существенное влияние оказывает то, что энергия реакции ${}^8_4\text{Be} + ({}^4_2\text{He}, \gamma){}^{12}_6\text{C}$ $Q = +7,3667$ МэВ находится вблизи второго возбужденного состояния ядра ${}^{12}_6\text{C}^*$ с энергией 7,65 МэВ ($J_p = 0^+$), которое называется состоянием Ф. Хойла. Такая реакция имеет резонансный характер, что значительно увеличивает ее скорость [21]. Тройной процесс слияния ядер гелия эффективно происходит при температурах $T \approx 100 \cdot 10^6 - 200 \cdot 10^6$ К, т.е. при энергиях $E_{\text{He}} \approx 12,9 - 25,8$ кэВ. По мере накопления ядер углерода начинает происходить реакция



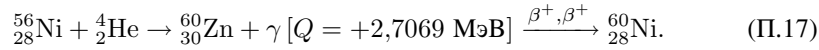
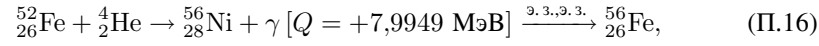
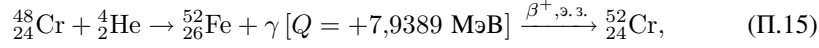
Из таблицы распространенности элементов в природе (см. табл. 17 в заключении к [21]) видно, $N \cdot \alpha$ -ядра ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{20}_{10}\text{Ne}$, ${}^{24}_{12}\text{Mg}$, ${}^{28}_{14}\text{Si}$ и ${}^{32}_{16}\text{S}$ более распространены по сравнению с соседними и образуются в реакциях



Эти реакции могут быть продолжены далее с учетом обнаруженных в РМЗА элементов (см. табл. 1–4):

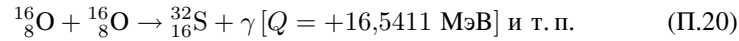
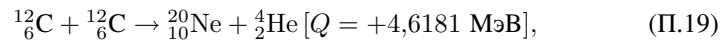
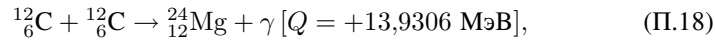


*э.з. — электрозахват.



Отметим, что в четырех последних реакциях промежуточные ядра не-стабильны, но имеют достаточно большие времена жизни по сравнению с временем облучения HeHPC γ -квантами.

Помимо реакций с гелием, возможны и другие подбарьерные реакции между более тяжелыми ядрами типа:



Как видно, в реакциях с участием гелия (П.5)–(П.20) образуются только определенные изотопы химических элементов массами, кратными массе ядра гелия. Этот эффект может быть решающей проверкой правильности предлагаемого объяснения наблюдаемых явлений.

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. 22001. P. 1–6.
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. 42002. P. 1–6.
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 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 P15-2012-50. Дубна, 2012.
5. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R., Wilczynska-Kitowska T.* Deuteron Disintegration, Thermonuclear and Nuclear Fission Reactions Induced by γ -Quanta in D-Saturated Palladium and Dense Deuterium Gas with Synthesis of New Structures // *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques.* 2013. V. 7, No. 2. P. 239–247.

6. *Didyk A. Yu., Wiśniewski 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; JINR Preprint P15-2013-20. Dubna, 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. *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.
12. *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 P15-2012-75. Дубна, 2012.
13. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Results from the Irradiating Aluminum and Homogeneous Alloy YMn₂ by 23 MeV γ -Quanta in a Molecular Deuterium Atmosphere at 2 kbar Pressure // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2014. V. 11, No. 2. P. 169–179.
14. *Didyk A. Yu., Wiśniewski R.* Results from the Irradiation of Stainless Steel and Copper by 23 MeV γ -Quanta in the Atmosphere of Molecular Deuterium at a Pressure of 2 kbar // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2014. V. 11, No. 3. P. 309–328.
15. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П.* 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 P15-2013-80. Дубна, 2013; Письма в ЭЧАЯ. 2014 (в печати).
16. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П.* Синтез микрочастиц в молекулярном водороде при давлении 1 кбар в ядерных реакциях под действием тормозных γ -квантов с пороговой энергией 10 МэВ. Химический состав структур на внутренних поверхностях компонентов камеры высокого давления. Препринт ОИЯИ P15-2014-2. Дубна, 2014; Письма в ЭЧАЯ. 2014 (в печати).
17. *Дидык А. Ю., Вишневецкий П.* Синтез микрочастиц в молекулярном водороде при давлении 1 кбар в ядерных реакциях под действием тормозных γ -квантов с пороговой энергией 10 МэВ. Химический состав синтезированных частиц и структур на поверхности реакционной камеры. Препринт ОИЯИ P15-2014-3. Дубна, 2014; Письма в ЭЧАЯ. 2014 (в печати).

18. 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. 2014 (в печати).
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 Р15-2014-7. Дубна, 2014; Письма в ЭЧАЯ. 2014 (в печати).
20. 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.
21. Ишханов Б. С., Капитонов И. М., Тутынь И. А. Нуклеосинтез во Вселенной. М.: Либроком, 2009; <http://nuclphysinpmsu.ru/nuclsynth.html>.
22. Мухин К. Н. Экспериментальная ядерная физика. Т. 1. Физика атомного ядра. М.: Энергоатомиздат, 1983. 616 с.
23. Bethe H. A. Energy Production in Stars // Phys. Rev. 1939. V. 55. P. 434–456.
24. Gamov G. Nuclear Energy Sources and Stellar Evolution // Phys. Rev. 1938. V. 53. P. 595–604.
25. Marshak R. E., Morse P. M., York H. Equation of State of Hydrogen, Helium, and Russel Mixture at High Temperatures and Pressures // Astrophys. J. 1950. V. 111. P. 214–220.
26. Углов В. В. Радиационные эффекты в твердых телах. Минск: БГУ, 2011. 207 с.
27. Ишханов Б. С., Капитонов И. М. Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами. М.: Изд-во МГУ, 1979. 215 с.
28. Дидык А. Ю., Вишневецкий Р. Ядерные реакции, синтез элементов и новых структур в плотном гелии при давлении 1 кбар под действием облучения тормозными γ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ. Препринт ОИЯИ Р15-2014-50. Дубна, 2014.

Получено 7 мая 2014 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 28.07.2014.

Формат 60 × 90/16.

Усл. печ. л. 1,4. Уч.-изд. л. 1,8. Тираж 225 экз. Заказ № 58302.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/