

# ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ В СИСТЕМАХ Pd/PdO:D<sub>x</sub> И Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> ПРИ ИХ ВОЗБУЖДЕНИИ ИОНИЗИРУЮЩИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

*И. П. Чернов<sup>a</sup>, А. С. Русецкий<sup>b\*</sup>, Д. Н. Краснов<sup>a</sup>, В. В. Ларионов<sup>a</sup>,  
Б. Ф. Ляхов<sup>c</sup>, Е. И. Саунин<sup>c</sup>, Ю. И. Тюрин<sup>a</sup>, Ю. П. Черданцев<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> *Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, Томск, Россия*

<sup>b</sup> *Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук  
119991, Москва, Россия*

<sup>c</sup> *Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина Российской академии наук  
119991, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 18 октября 2010 г.

Изучен выход продуктов ядерных реакций из палладия и титана, насыщенных дейтерием, в процессе воздействия электронного пучка и рентгеновских лучей. Детектирование заряженных частиц осуществлялось трековыми детекторами CR-39, не чувствительными к электронным помехам, электронам и рентгеновским квантам. Для идентификации типа и энергии частиц использовали одновременно три детектора, обернутые фольгами (Al и Cu) различной толщины. Статистически достоверно установлено, что воздействие электронов с энергией 30 кэВ и рентгеновских квантов инициирует в системах Pd/PdO:D<sub>x</sub> и Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> синтез ядер дейтерия с выходом протонов с энергией 3 МэВ.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–3] было показано, что атомы дейтерия D (водорода H) в металлах способны аккумулировать энергию ионизирующего излучения (ускоренных электронов, рентгеновских лучей), в результате чего дейтериевая (водородная) подсистема переходит в возбужденное состояние и энергия атомов H (D) в ней становится на порядки выше, чем энергия атомов матрицы. Об этом свидетельствуют следующие экспериментальные факты:

интенсивная миграция и выход изотопов водорода из металлов при комнатной и более низкой температуре при облучении;

выход атомов H (D) из всего объема образца в процессе воздействия сфокусированного электронного пучка (диаметр пучка значительно меньше, чем размер мишени);

выход H (D) в атомарной форме со всей поверхности образца даже тогда, когда облучению подвергается только небольшая его часть, что свидетельству-

ет о том, что атомы в процессе воздействия излучения приобретают энергию, достаточную для преодоления барьера на поверхности металлов (более 1 эВ).

Известно, что ускоренные электроны и рентгеновские лучи теряют свою энергию в твердом теле главным образом за счет возбуждения его электронной подсистемы. Время жизни этих возбуждений в металлах составляет очень малую величину, порядка 10<sup>-15</sup> с. Поэтому возникает вопрос, каким образом электронная подсистема в PdD<sub>x</sub> успевает передавать поглощенную энергию атомам H (D) по всему объему кристалла. Ответ на этот вопрос был получен при исследовании эволюции электронной структуры и спектра возбуждения металлов по мере насыщения их водородом.

В работах [4, 5] в рамках подхода *ab initio* исследовались электронная структура и спектр коллективных электронных возбуждений в Pd и PdH<sub>x</sub>. Было обнаружено, что связывающие и антисвязывающие состояния PdH<sub>x</sub> имеют локальный характер, что указывает на локальность в окрестности атомов водорода осцилляций электронной плотности, отвечающих доминирующим плазменным колеба-

\*E-mail: rusets@lebedev.ru

ям. Кроме того, оказалось, что водород значительно понижает частоту плазменных колебаний валентной зарядовой плотности металла. Поэтому основная часть энергии проникающего в кристалл ионизирующего излучения поглощается за счет возбуждения плазмонов, которые, в свою очередь, служат эффективным механизмом распространения энергии по всему образцу с ее преимущественной локализацией в окрестности атомов водорода.

Оставалось неясным, какую же энергию атомы дейтерия способны приобрести при воздействии излучения, в частности, достаточна ли она для осуществления ядерных реакций. В работе [5] исследовалась возможность протекания ядерных реакций при облучении электронами с энергией 30 кэВ и током 300 нА мишени Pd/PdO:D<sub>x</sub>, и оказалось, что облучение инициирует выход протонов с энергией 3 МэВ. В настоящей работе подтверждены ранее полученные экспериментальные результаты, исследован выход из Pd/PdO:D<sub>x</sub> продуктов ядерных реакций в зависимости от плотности тока электронов, а также изучены ядерные процессы в системе Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub>, стимулированные электронным пучком и рентгеновскими квантами.

## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Детектирование заряженных частиц осуществлялось пластиковыми трековыми детекторами CR-39 (RadTrak) производства фирмы Landauer/Fukui, USA. Для идентификации типа и количественных оценок энергии частиц использовались одновременно два или три детектора, обернутые фольгами (Al и Cu) различной толщины. Предварительно трековые детекторы калибровались с помощью ускорителя Ван де Граафа (энергия протонов 0.65–3.0 МэВ), циклотрона (энергия альфа-частиц 10–30 МэВ) и стандартных альфа-источников. Калибровочные кривые, зависимости диаметров  $d$  треков протонов и альфа-частиц от энергии при травлении трекового детектора в 6M-растворе NaOH при температуре 70 °C представлены на рис. 1. Диаметры треков в диапазоне 5.0–6.6 мкм соответствуют протонам с энергией  $E_p = 1–3$  МэВ. Треки протонов можно отделить от треков альфа-частиц с энергией  $E_\alpha < 20$  МэВ, диаметры которых лежат в диапазоне 7.0–12 мкм. Измеряя размеры треков в детекторах и используя табличные данные о потерях энергии частиц в фольгах, можно однозначно определять сорт частиц и их энергию в момент вылета из образца.

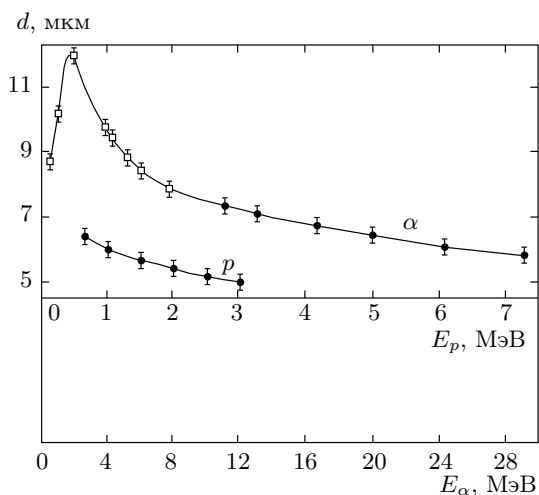
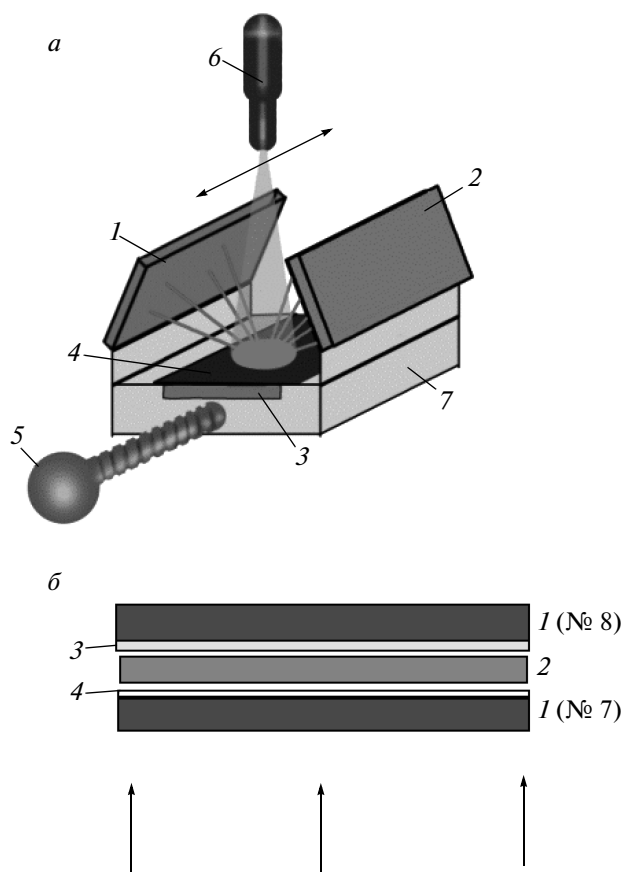


Рис. 1. Диаметр треков протонов ( $p$ ) и альфа-частиц ( $\alpha$ ) в зависимости от их энергии в детекторе CR-39 после травления в течение 7 ч в 6M-растворе NaOH при температуре 70 °C

Образцы Pd/PdO:D<sub>x</sub> размером  $2.5 \times 1$  см<sup>2</sup> готовились путем термического окисления Pd-фольги (99.95 % чистоты, толщиной 50 мкм). В результате на поверхности фольги образуется окисная пленка PdO толщиной примерно 20 нм [6]. Затем образцы насыщались дейтерием с помощью электролиза в 0.3M-растворе LiOD в D<sub>2</sub>O с Pt-анодом при плотности тока  $j = 10$  мА/см<sup>2</sup> и температуре около 279 К в ячейке с разделенными катодным и анодным пространствами. После насыщения дейтерием до степени  $x = D/Pd \approx 0.73$  образцы промывались в тяжелой воде, охлаждались жидким азотом до температуры  $T = 77$  К и в течение 1 мин устанавливались в держатель напротив закрепленных детекторов CR-39 (рис. 2a).

Образцы Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> размером  $3 \times 1$  см<sup>2</sup> были изготовлены из титановой фольги толщиной 300 мкм и окисного слоя TiO<sub>2</sub> толщиной около 100 нм путем электролитического насыщения дейтерием из 1M-раствора D<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в D<sub>2</sub>O при плотности тока 30 мА/см<sup>2</sup>. Последующее взвешивание показало, что за время электролиза в течение 24 ч в каждый образец входило 0.25 мг дейтерия. Это обеспечивало среднюю степень насыщения  $x = D/Ti = 0.1$  на глубину до 3 мкм.

При исследовании воздействия электронов на выход продуктов DD-синтеза образцы и детекторы помещались в вакуумную камеру сканирующего электронного микроскопа ( $P = 10^{-6}$  мм рт. ст.), энергия электронов составляла 30 кэВ, плотность тока



**Рис. 2.** Схема эксперимента: *a* — воздействие электронов (1, 2, 3 — детекторы CR-39, 4 — образец, 5 — манипулятор, 6 — электронная пушка, 7 — подложка); *b* — воздействие рентгеновских квантов (1 — детекторы CR-39, 2 — образец, 3 — Cu (25 мкм), 4 — Al (11 мкм). Стрелками показано направление рентгеновского пучка)

0.53 и 2.1 мкА/см<sup>2</sup>, диаметр пятна 6 мм (рис. 2*a*). Два детектора располагались над открытой поверхностью образца (под углом 60°), детекторы 1 (4) покрывались Al-фольгой толщиной 11 мкм, детекторы 2 (5) — Cu-фольгой толщиной 25 мкм. Расстояние между центром электронного пятна на образце и детекторами составляло 12 мм. Детектор 3 (6), обернутый Al-фольгой толщиной 33 мкм, находился в контакте с обратной стороной образца Pd/PdO:D<sub>x</sub> или Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub>, которая непосредственно не подвергалась электронному облучению (в скобках даны номера детекторов для образцов Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub>). В случае исследования воздействия рентгеновских лучей образцы Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> облучались на рентгеновской установке (напряжение  $U = 120$  кВ, ток  $I = 5$  мА, вольфрамовый катод) на воздухе и располагались

между двумя детекторами 7 и 8, покрытыми фольгой из Al и Cu толщиной соответственно 11 и 25 мкм (рис. 2*b*). После экспозиции детекторы подвергались травлению в течение 7 ч в 6*M*-растворе NaOH при температуре 70 °С.

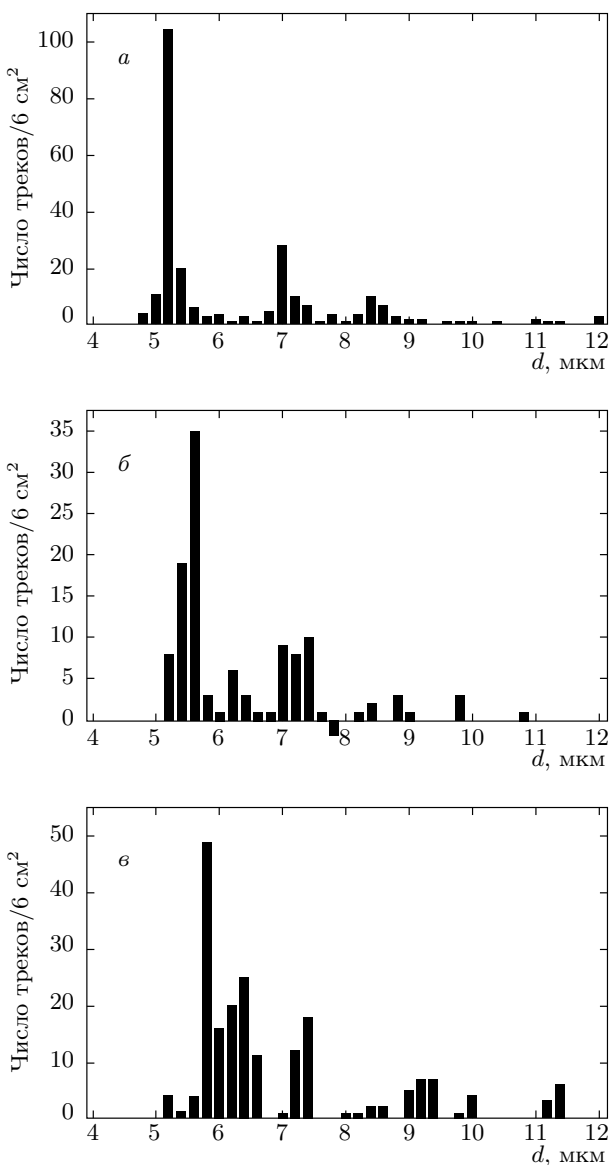
Анализ распределений треков в детекторах проводили в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН на автоматизированной установке ПАВИКОМ [7]. При этом для построения распределений учитывали только «круглые» треки (нормального падения или с отклонением от нормали менее 10°). В этих условиях полная эффективность составила  $\epsilon = 2.6\%$  для детекторов 1, 2, 4, 5 и  $\epsilon \approx 13\%$  для детекторов 3, 6, 7, 8.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ треков в фоновом детекторе, который в процессе эксперимента находился в вакуумной камере микроскопа вдали от образцов, показал, что в спектре нет статистически значимых максимумов в интервале диаметров треков 4–6 мкм; такой же результат имел место при длительном облучении электронами образцов Pd/PdO:H<sub>x</sub> и Ti/TiO<sub>2</sub>:H<sub>x</sub>.

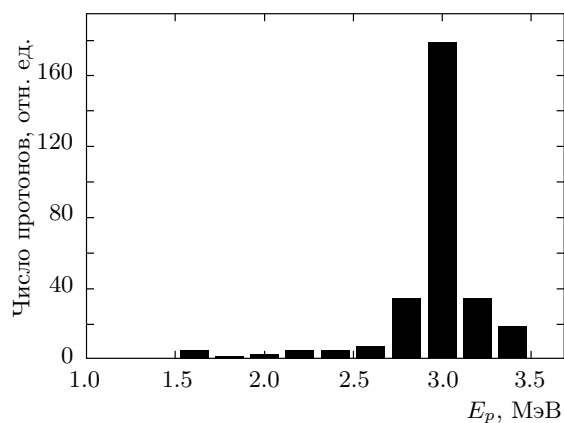
В настоящей работе представлены результаты пяти сеансов измерений выхода продуктов DD-синтеза при облучении электронами Pd/PdO:D<sub>x</sub> по одному сеансу в квартал. В четырех сеансах средняя плотность электронного пучка составляла около 0.53 мкА/см<sup>2</sup>, а время экспозиции — около 1100 мин за сеанс. Наблюдалась хорошая повторяемость результатов, интегральные выходы протонов в каждом сеансе с хорошей точностью совпадали. С учетом эффективности детектирования усредненная по данным детекторов 1 и 2 скорость выхода 3-МэВ протонов со стороны образца, облучаемой электронами, составила  $N_p = (1.1 \pm 0.1) \cdot 10^{-3}$  частиц/с·см<sup>2</sup> · 4π ср, а с противоположной стороны образца —  $N_p = (7.2 \pm 1.6) \cdot 10^{-4}$  частиц/с·см<sup>2</sup> · 4π ср, что в 1.5 раза меньше, чем для облучаемой стороны (см. таблицу). В пятом сеансе измерений плотность потока электронов была увеличена в четыре раза и составила 2.1 мкА/см<sup>2</sup>, а усредненная по детекторам 1 и 2 скорость выхода 3-МэВ протонов увеличилась в два раза.

Суммарные гистограммы распределения треков заряженных частиц в детекторах 1, 2 и 3 при облучении электронами в течение всего времени экспозиции (7020 мин) представлены на рис. 3. В детек-



**Рис. 3.** Распределения диаметров треков заряженных частиц в детекторах 1 с покрытием Al (11 мкм) (а), 2 — Cu (25 мкм) (б) и 3 — Al (33 мкм) (в) при воздействии электронов с энергией 30 кэВ на образец Pd/PdO:D<sub>x</sub> в течение 7020 мин. Приведена разница показаний передней (т.е. обращенной к образцу) и задней (фоновой) сторон детектора

торе 1 в интервале диаметров треков 5.2–5.4 мкм и в детекторе 2 в интервале 5.8–6.4 мкм наблюдаются статистически значимые максимумы (рис. 3а,б), которые, согласно калибровке, соответствуют протонам с энергией 2.5–2.75 и 1.2–1.3 МэВ. Именно эта энергия ожидается при прохождении 3-МэВ протонами слоя алюминия толщиной 11 мкм в детекторе

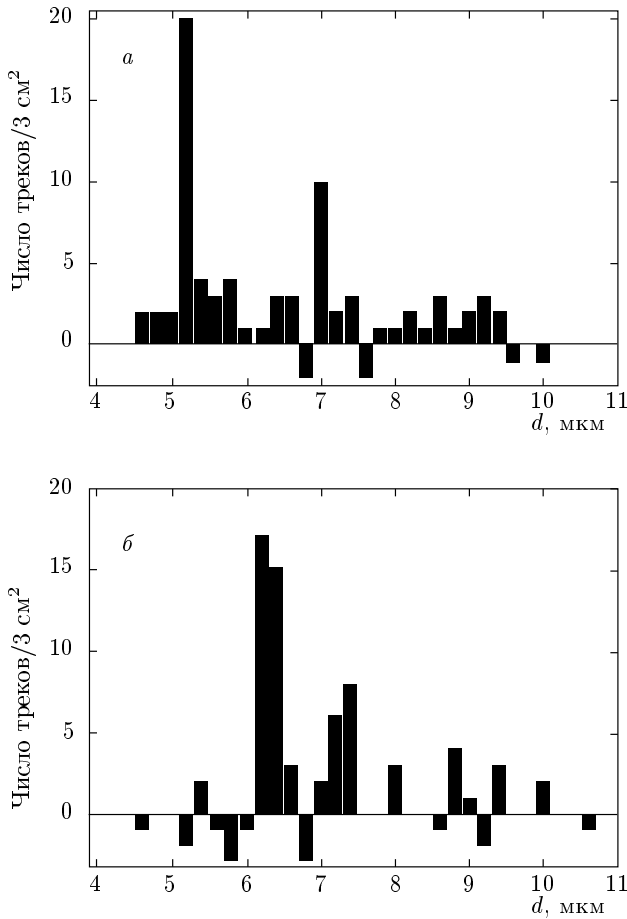


**Рис. 4.** Восстановленный энергетический спектр протонов, зарегистрированных в детекторах 1, 2 и 3 при воздействии электронов с энергией 30 кэВ на образец Pd/PdO:D<sub>x</sub> в течение 7020 мин

1 и слоя меди толщиной 25 мкм в детекторе 2 [8]. Важно заметить, что эмиссия 3-МэВ протонов имеет место и с обратной стороны образца (детектор 3, рис. 3в), т.е. со стороны, на которую непосредственно не воздействуют электроны (пробег электронов с энергией 30 кэВ в Pd составляет единицы микрометров, толщина образца 50 мкм). В детекторе 3 максимумы в спектре треков наблюдаются при диаметрах треков 5.6 мкм. Этот диаметр соответствует протонам с энергией  $E_p \approx 2.0$  МэВ, которые образуются при прохождении 3-МэВ протонов из DD-реакции через 33-мкм фильтр из Al. Выход 3-МэВ протонов с обратной стороны образца указывает на то, что атомы дейтерия в процессе воздействия электронного пучка приобретают энергию не только в области непосредственного воздействия пучка, но и во всем объеме образца. Этот факт подтверждает плазменный механизм возбуждения дейтериевой подсистемы в металлах ионизирующим излучением [3, 4].

Восстановленный суммарный энергетический спектр протонов, испускаемых образцом Pd/PdO:D<sub>x</sub> в процессе облучения в течение 7020 мин и зарегистрированных детекторами 1, 2 и 3, представлен на рис. 4. Выход 3-МэВ протонов статистически достоверно наблюдается в трех независимых детекторах, что однозначно свидетельствует о DD-синтезе в образцах Pd/PdO:D<sub>x</sub> при воздействии электронного пучка.

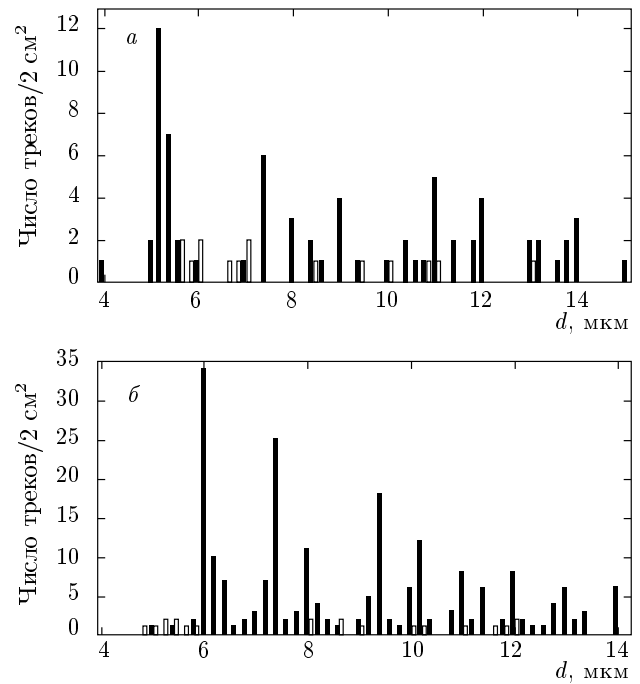
Результаты исследования воздействия ускоренных электронов и рентгеновского излучения на Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> представлены на рис. 5–8. Распределения диаметров треков в детекторах 4 и 5 после воз-



**Рис. 5.** Распределения диаметров треков заряженных частиц в детекторах 4 с покрытием Al (11 мкм) (а) и 5 — с покрытием Cu (25 мкм) (б) при воздействии электронов с энергией 30 кэВ на образец Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> в течение 2200 мин. Приведена разница показаний передней (т. е. обращенной к образцу) и задней (фоновой) сторон детектора

действия электронов с энергией 30 кэВ и плотностью тока 0.53 мкА в течение 2200 мин приведены на рис. 5. На распределениях наблюдается основной пик в области 5.0–6.6 мкм, который смещается вправо с ростом толщины покрытия. Согласно данным калибровки, этот пик может быть идентифицирован как сигнал от 3-МэВ протонов. Детектор 6, расположенный на необлученной стороне образца, не показал превышения над фоном.

Распределения диаметров треков для детекторов 7 и 8, бывших в контакте с образцом Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> при облучении рентгеновским пучком ( $I = 100$  мА,  $U = 120$  кВ, время облучения 240 мин), показаны на рис. 6. Также для сравнения приведены фоновые распределения с задних сторон рабочих детекторов.

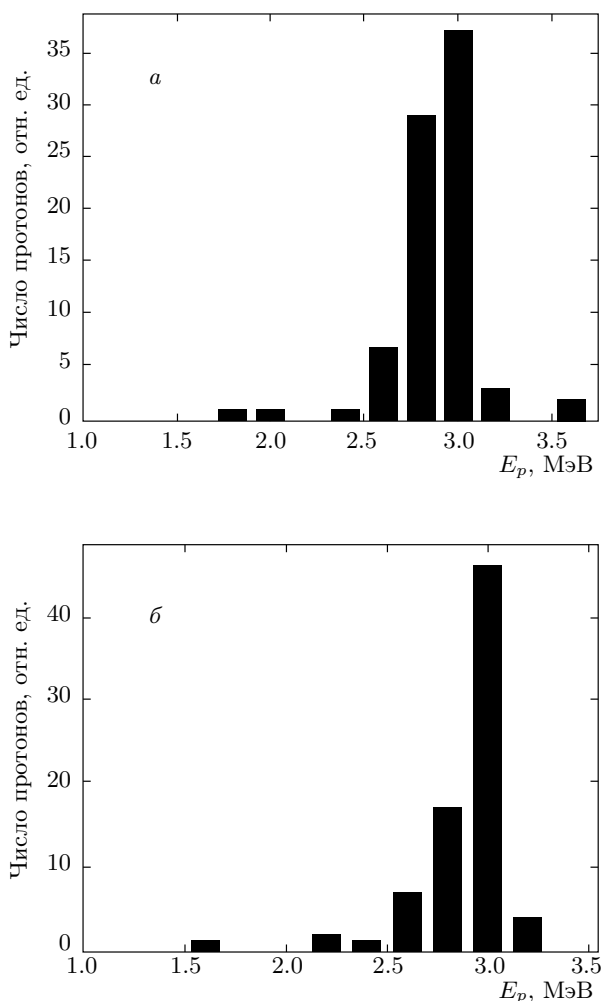


**Рис. 6.** Распределения диаметров треков заряженных частиц в детекторах 7 с Al-покрытием толщиной 11 мкм (а) и 8 — с Cu-покрытием толщиной 25 мкм (б) при воздействии рентгеновских квантов на образец Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> в течение 240 мин. Для сравнения приведены распределения задних (фоновых) сторон детекторов (светлые столбцы)

Крайний левый пик в распределениях, согласно калибровке, отвечает протонам с начальной энергией 3 МэВ.

Восстановленные суммарные энергетические спектры протонов для данных экспериментов показаны на рис. 7а (электронный пучок) и рис. 7б (рентгеновский пучок). Отметим также, что кроме протонных пиков в диапазоне 5.0–6.6 мкм на распределениях (см. рис. 5, 6) присутствуют пики при диаметрах больше 7.0 мкм, которые, согласно калибровке, отвечают альфа-частицам различных энергий. Из рис. 7 видно, что воздействие ускоренных электронов и рентгеновского излучения на Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> стимулирует выход 3-МэВ протонов, как и в случае облучения электронами образцов Pd/PdO:D<sub>x</sub>.

Обращает на себя внимание тот факт, что при воздействии электронного пучка на образцы Pd/PdO:D<sub>x</sub> наблюдается выход протонов преимущественно с энергией 3 МэВ как с облучаемой, так и с необлучаемой сторон образца. В случае образца Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> его большая толщина (300 мкм),



**Рис. 7.** Восстановленные энергетические спектры протонов, зарегистрированных в детекторах 4 и 5 при воздействии электронов с энергией 30 кэВ в течение 2200 мин (а) и в детекторах 7 и 8 при воздействии рентгеновских квантов в течение 240 мин (б) на образце Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub>

вероятно, не позволила плазмонам достичь противоположной стороны образца, и эмиссии протонов с нее не наблюдается. Следовательно, ядерные процессы протекают преимущественно в приповерхностной области образца, по-видимому, на границах Pd-PdO и Ti-TiO<sub>2</sub>. Одной из причин такой ситуации является повышенная концентрация дейтерия на границе металл-диэлектрик, поскольку радиационно-стимулированная диффузия дейтерия в металлах значительно выше, чем в окиси металлов. Другая возможная причина — более высокая энергия атомов дейтерия на границе, чем в объеме, в связи с особенностями плазмонного

механизма ускорения атомов. Интерференция плазмонов, возникающих в объеме и на поверхности образца, может привести к увеличению амплитуды осцилляций электронной плотности и, как следствие, к появлению электрического поля, в котором атомы дейтерия способны приобрести энергию, достаточную для их слияния.

В таблице приведены потоки протонов при воздействии электронного пучка и рентгеновских лучей на Pd/PdO:D<sub>x</sub> и Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub>. Из таблицы следует, что потоки 3-МэВ протонов из образцов Pd/PdO:D<sub>x</sub> и Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> при воздействии электронов с энергией 30 кэВ примерно одинаковы. При воздействии рентгеновских лучей на Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> выход протонов на порядок выше, чем при воздействии электронов. В первую очередь, это связано с существенным увеличением мощности рентгеновских лучей по сравнению с электронным пучком, но, по-видимому, и с тем, что рентгеновское излучение воздействует на весь объем образца, а электроны — только на его тонкий поверхностный слой. Также видно, что поток протонов с энергией 3 МэВ, зарегистрированный детектором 8, расположенным передней стороной против пучка, в 2.5 раза превышает величину потока, зарегистрированную детектором 7, расположенным передней стороной по пучку. Таким образом, налицо сильная анизотропия в потоках частиц, испущенных из образца по рентгеновскому пучку и против него (поток частиц больше вдоль пучка).

Выход DD-реакции из мишеней Pd/PdO:D<sub>x</sub> и Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> оценивался по формуле (1) по методике, подробно описанной в работе [9]:

$$Y_{DD} = J_D N_{eff}(T) \int_0^{E_a} dE f(E) \sigma_{DD}(E) \frac{dx}{dE}, \quad (1)$$

где  $J_D$  — плотность тока ионов дейтерия,  $N_{eff}(T)$  — эффективная концентрация дейтерия на поверхности при температуре  $T$ ,

$$N_{eff}(T) = N_0 \exp(-\varepsilon_D \Delta T / k_B T T_0),$$

$N_0$  — концентрация дейтерия при  $T_0 = 290$  К,  $\varepsilon_D$  — энергия активации выхода атома D с поверхности),  $k_B$  — постоянная Больцмана,  $f(E)$  — коэффициент усиления,  $\sigma_{DD}$  — сечение DD-реакции без усиления,  $dx/dE$  — тормозная способность для ионов D в мишени [10].

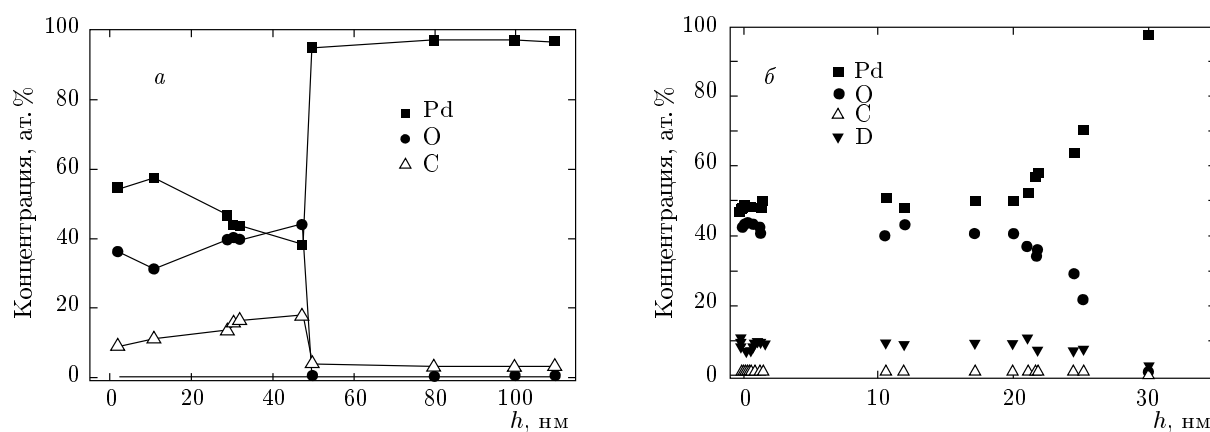
Коэффициент усиления определяется как

$$f(E) = \frac{Y_{exp}(E)}{Y_{BH}(E)} = \exp \left[ \pi \eta(E) \frac{U_e}{E} \right], \quad (2)$$

**Таблица.** Потоки протонов при воздействии электронного пучка и рентгеновских лучей на образцы Pd/PdO:D<sub>x</sub> и Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub>

Номер детектора	Образец	Тип облучения	Толщина покрытия, мкм	Эффективность детектирования, %	$N_p, \frac{\text{протон}}{\text{с} \cdot \text{см}^2 \cdot 4\pi \text{ ср}}$
1	Pd/PdO:D <sub>x</sub>	e-пучок	11 (Al)	2.6	$(1.1 \pm 0.1) \cdot 10^{-3*}$
2	Pd/PdO:D <sub>x</sub>	e-пучок	25 (Cu)	2.6	$(1.1 \pm 0.1) \cdot 10^{-3*}$
3	Pd/PdO:D <sub>x</sub>	e-пучок	33 (Al)	13	$(7.2 \pm 1.6) \cdot 10^{-4}$
4	Ti/TiO <sub>2</sub> :D <sub>x</sub>	e-пучок	11 (Al)	2.6	$(8.4 \pm 1.5) \cdot 10^{-4*}$
5	Ti/TiO <sub>2</sub> :D <sub>x</sub>	e-пучок	25 (Cu)	2.6	$(8.4 \pm 1.5) \cdot 10^{-4*}$
6	Ti/TiO <sub>2</sub> :D <sub>x</sub>	e-пучок	33 (Al)	13	0
7	Ti/TiO <sub>2</sub> :D <sub>x</sub>	X-пучок	11 (Al)	13	$(1.5 \pm 0.3) \cdot 10^{-2}$
8	Ti/TiO <sub>2</sub> :D <sub>x</sub>	X-пучок	25 (Cu)	13	$(3.8 \pm 0.4) \cdot 10^{-2}$

Примечание: \* — средний поток по данным двух детекторов.



**Рис. 8.** Профили поверхностей образцов Pd/PdO, полученные методом обратного рассеяния, до насыщения дейтерием и до облучения электронами (а), а также после насыщения дейтерием и облучения электронами (б);  $h$  — глубина

где  $Y_{exp}(E)$  — экспериментальный выход DD-протонов,  $Y_{BH}(E)$  — выход при той же энергии, определенный в соответствии с экстраполяцией Боша–Халле [11],  $2\pi\eta = 31.29Z^2\sqrt{\mu/E}$  — параметр Зоммерфельда,  $Z$  — заряд иона D,  $\mu$  и  $E$  — приведенная масса и энергия иона D.

Потенциал экранирования  $U_e$  оценивался по полуэмпирической формуле [12]:

$$U_e = (T/T_0)^{-1/2} (a \ln y + b), \quad (3)$$

где  $a = 145.3$  и  $b = 71.2$  — численные константы,

а  $y = ky_0(J_D/J_0)$ ,  $y_0 = \text{Pd/D}$  при  $T_0 = 290$  К и  $J_0 = 0.03$  мА/см<sup>2</sup>.

Чтобы оценить выходы DD-реакции из мишеней Pd/PdO:D<sub>x</sub> и Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> при электронном облучении, мы использовали упрощенную модель процесса, принимая во внимание, что десорбция дейтерия, стимулированная e-пучком, приводит к току ионов дейтерия,двигающихся к поверхности образца. Такой ток можно рассматривать как «пучок», а дейтерированную поверхность как «мишень».

Согласно измерениям скорости десорбции дейте-

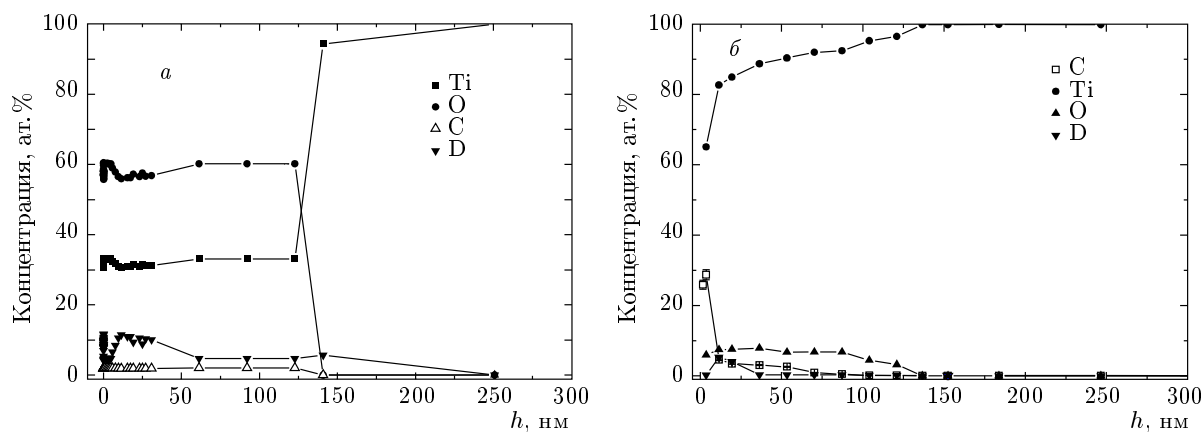


Рис. 9. Профили поверхностей образцов  $\text{Ti}/\text{TiO}_2:\text{D}_x$ , полученные методом обратного рассеяния, до (а) и после (б) облучения электронами;  $h$  — глубина

рия из мишеней при облучении  $e$ -пучком, ток ионов  $\text{D}$  для  $\text{Pd}/\text{PdO}:\text{D}_x$  и  $\text{Ti}/\text{TiO}_2:\text{D}_x$  составил соответственно  $J_{\text{D}} = 0.5 \text{ mA}/\text{cm}^2$  и  $J_{\text{D}} = 0.03 \text{ mA}/\text{cm}^2$ . Концентрации дейтерия в  $\text{Pd}/\text{PdO}:\text{D}_x$  и  $\text{Ti}/\text{TiO}_2:\text{D}_x$  после электролиза равны  $\langle \text{D}/\text{Pd} \rangle = 0.15$  и  $\langle \text{D}/\text{Ti} \rangle = 0.3$ . Подставляя эти значения в формулу (2), для потенциала экранирования получаем  $U_e = 730 \pm 50 \text{ эВ}$  для  $\text{Pd}$  и  $U_e = 130 \pm 30 \text{ эВ}$  для  $\text{Ti}$ . Эти значения находятся в хорошем согласии с данными, полученными в экспериментах на ускорителе [13–15].

Наблюдаемая скорость  $\text{DD}$ -реакции (порядка  $10^{-3}$  протон/с·см<sup>2</sup> · 4 $\pi$ sr) может быть достигнута в  $\text{Pd}/\text{PdO}:\text{D}_x$  (при потенциале экранирования  $U_e = 730 \text{ эВ}$ ) только в предположении, что средняя энергия десорбируемых ионов  $\text{D}$  достигает  $\langle E_{\text{D}} \rangle \approx 3\text{--}4 \text{ эВ}$ . В случае мишени  $\text{Ti}/\text{TiO}_2:\text{D}_x$  при  $U_e = 130 \text{ эВ}$  наблюдаемый выход протонов может быть только при  $\langle E_{\text{D}} \rangle \approx 500 \text{ эВ}$ .

Эти результаты могут быть объяснены механизмом ускорения ионов  $\text{D}$  в мишенях при  $e$ -облучении, согласно которому при этом возникают сильные межатомные поля ( $10^7\text{--}10^8 \text{ В}/\text{см}$ ), ускоряющие ионы  $\text{D}$  по направлению к поверхности, где концентрация дейтерия максимальна. В сочетании с возможным сильным электронным экранированием, наиболее ярко выраженным в металлах с большой подвижностью дейтерия, это может привести к значительному усилению выхода  $\text{DD}$ -реакции в дейтеридах металлов даже при малой энергии их возбуждения.

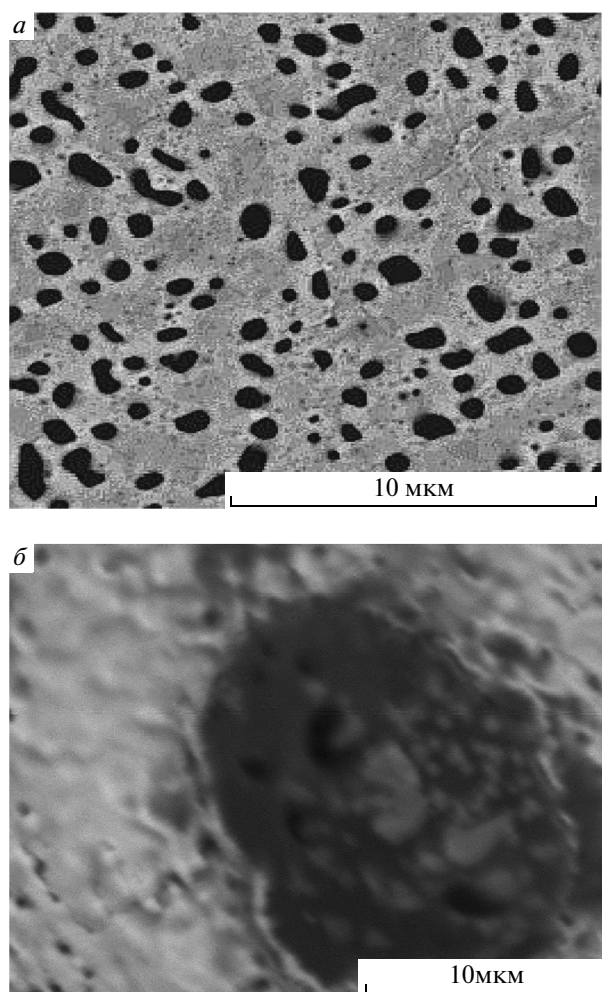
Для подтверждения предложенного механизма мы провели исследования изменения структуры поверхности образцов до и после облучения

$e$ -пучком. Для анализа поверхности были использованы метод резерфордовского обратного рассеяния альфа-частиц на ядрах мишени и электронная микроскопия.

Профили поверхностей образцов  $\text{Pd}/\text{PdO}:\text{D}_x$  и  $\text{Ti}/\text{TiO}_2:\text{D}_x$ , полученные методом обратного рассеяния, до и после облучения электронами приведены на рис. 8 и 9. Видно, что после облучения  $\text{Pd}/\text{PdO}:\text{D}_x$  в течение 50 мин значительно уменьшаются толщины слоев  $\text{PdO}$  и  $\text{C}$  (с 40 до 25 нм), рис. 8б. Слой углерода возникает в результате отжига палладия в пламени кислородной горелки и является стабилизатором оксидного слоя  $\text{PdO}$ . Остаточный дейтерий локализуется вблизи поверхности  $\text{PdO}$ . Средняя скорость десорбции дейтерия после облучения в вакууме сравнима со скоростью десорбции в атмосфере без облучения,  $(2\text{--}3) \cdot 10^{15}$  частиц/с·см<sup>2</sup>. В случае мишени  $\text{Ti}/\text{TiO}_2:\text{D}_x$  до облучения оксидный слой  $\text{TiO}_2$  наблюдается на глубине до 150 нм (рис. 9а). После облучения происходит уменьшение содержания кислорода в оксиде ( $\text{TiO}_{0.1}$ ), рис. 9б. Глубина оксидного слоя при этом не изменилась. Отметим, что при облучении рентгеновскими квантами видно сходное уменьшение содержания кислорода на поверхности. Используя данные по обратному рассеянию до и после облучения  $\text{Ti}/\text{TiO}_2:\text{D}_x$ , мы получили, что скорость десорбции дейтерия составляет около  $1.5 \cdot 10^{14}$  частиц/с·см<sup>2</sup>, что примерно в 20 раз меньше, чем соответствующая величина для  $\text{Pd}/\text{PdO}:\text{D}_x$ .

Изображения поверхностей образцов  $\text{Pd}/\text{PdO}:\text{D}_x$  и  $\text{Ti}/\text{TiO}_2:\text{D}_x$ , полученные с помощью электронного микроскопа, приведены на рис. 10 и 11. Видно, что после насыщения дейтерием и  $e$ -облучения на

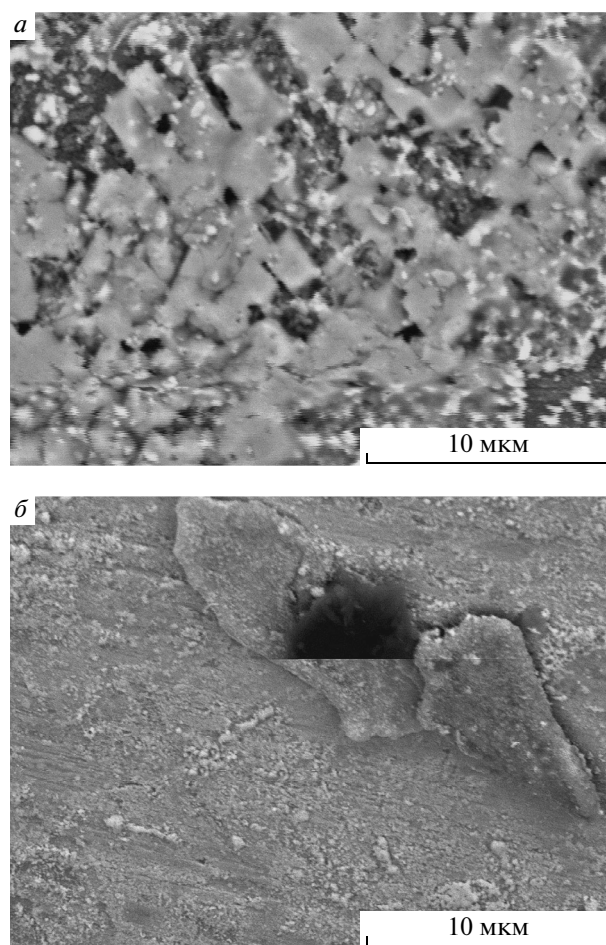




**Рис. 10.** Изображения поверхностей образцов Pd/PdO:D<sub>x</sub>, полученные с помощью электронного микроскопа: *a* — поверхность Pd/PdO после облучения электронами; *б* — кратер на поверхности Pd/PdO

поверхности Pd/PdO образуются многочисленные поры диаметром 100–2000 нм (рис. 10*a*). Также на поверхности были обнаружены «кратеры» диаметром 10–12 мкм (рис. 10*б*). На поверхности образца Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> видны следы покрытия TiO<sub>2</sub> + TiC<sub>x</sub> (рис. 11*a*). После *e*-облучения поры не образуются, однако наблюдалось образование кратеров диаметром 10–12 мкм (рис. 11*б*).

На основании полученных данных мы можем сделать следующие выводы. Присутствие тонкого оксидного слоя на поверхности Pd-фольги не позволяет обеспечить значительного ускорения ионов дейтерия. Действительно, поскольку PdO — это полуметалл со значительной проводимостью (удельное сопротивление  $\rho \approx 0.1$  Ом·см), поляризация поверх-



**Рис. 11.** Изображения поверхностей образцов Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub>, полученные с помощью электронного микроскопа: *a* — поверхность Ti/TiO<sub>2</sub> после облучения электронами; *б* — кратер на поверхности Ti/TiO<sub>2</sub>

ности отсутствует. Наличие большого количества пор (длиной около 50 нм) дает возможность увеличить энергию ионов D за счет каналирования. В случае поверхности Ti/TiO<sub>2</sub> с толстым оксидным слоем (около 150 нм) высокая кинетическая энергия ионов D может достигаться за счет ускорения в сильном электрическом поле, образованном при *e*-облучении. Эффективная энергия ускорения может быть оценена как

$$E_D^{eff} = \varepsilon_0 + eF(\text{TiO}_2)h(\text{TiO}_2), \quad (4)$$

где  $\varepsilon_0 \approx 3$  эВ — первичная кинетическая энергия иона D<sup>+</sup> в титане, вызванная генерацией плазмонов;  $F(\text{TiO}_2) \approx 3.3 \cdot 10^7$  В/см — напряженность электрического поля в TiO<sub>2</sub>;  $h(\text{TiO}_2) = 1.5 \cdot 10^{-5}$  см — глубина слоя TiO<sub>2</sub>. При этом оценка дает максимальную энергию ускорения ионов D, равную  $E_D^{max} \approx 500$  эВ.

Образование кратеров диаметром 10–12 мкм на поверхности образцов свидетельствует о высокой концентрации энергии в этих областях. На наш взгляд, в этих областях («горячих зонах») протекание ядерных реакций наиболее вероятно.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статистически достоверно установлено, что облучение ускоренными электронами и рентгеновскими лучами образцов Pd/PdO:D<sub>x</sub> и Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> стимулирует ядерный синтез дейтерия с выходом 3-МэВ протонов. Ядерные процессы протекают преимущественно в приповерхностной области образца, наиболее вероятно на границах Pd–PdO и Ti–TiO<sub>2</sub>, где следует ожидать повышенной концентрации атомов дейтерия и более высокой их энергии в связи с особенностью плазмонного механизма ускорения.

Вопрос о полном теоретическом объяснении обнаруженных эффектов находится пока в стадии обсуждения. Отметим, что малая интенсивность наблюдаемых продуктов ядерных реакций не дает пока возможности непосредственно использовать обнаруженные эффекты для получения избыточной энергии. Ранее мы рассматривали, как эти процессы синтеза, протекающие на границе «первой стенки» термоядерного реактора типа ITER, могут повлиять на радиационную стойкость данных устройств [12]. Перспективность использования обнаруженных эффектов для целей энергетики может быть определена после всестороннего изучения зависимости их интенсивности от материала мишени, характера и степени ее возбуждения.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность В. В. Сохоревой и В. Г. Мирончику (ТПУ) за помощь в проведении экспериментов. Авторы также благодарны О. Д. Далькарову, В. А. Рябову и Н. Г. Полухиной (ФИАН) за полезные обсуждения проблем, затронутых в статье.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. I. P. Chernov, Yu. I. Tyurin, Yu. P. Cherdantzev et al., *Int. J. Hydrogen Energy* **24**, 359 (1999).
2. Yu. Tyurin and I. Chernov, *Int. J. Hydrogen Energy* **27**, 829 (2002).
3. V. M. Silkin, I. P. Chernov, P. M. Echenique et al., *Phys. Rev. B* **76**, 245105 (2007).
4. И. П. Чернов, Ю. П. Коротеев, *ДАН* **420**, 758 (2008).
5. А. Г. Липсон, И. П. Чернов, А. С. Русецкий и др., *ДАН* **425**, 621 (2009).
6. A. G. Lipson, B. F. Lyakhov, A. S. Roussetski et al., *Fusion Sci. Technol.* **38**, 238 (2000).
7. A. B. Aleksandrov, I. Yu. Apacheva, E. L. Feinberg et al., *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **535**, 542 (2004).
8. H. H. Anderson and J. F. Ziegler, *Hydrogen Stopping Power and Ranges in All Elements*, Pergamon Press, New York (1977).
9. А. Г. Липсон, А. С. Русецкий, А. Б. Карабут и др., *ЖЭТФ* **127**, 1334 (2005).
10. S. P. Möller, A. Csete, T. Ichioka et al., *Phys. Rev. Lett.* **88**, 193201 (2002).
11. H. S. Bosch and G. M. Halle, *Nucl. Fusion* **32**, 611 (1992).
12. А. Г. Липсон, А. С. Русецкий, Б. Ф. Ляхов и др., *Химия высоких энергий* **42**, 361 (2008).
13. F. Raiola, L. Gang, C. Bonomo et al., *Europhys. J. A* **19**, 283 (2004).
14. H. Yuki, J. Kasagi, A. G. Lipson et al., *Письма в ЖЭТФ* **68**, 785 (1998).
15. J. Kasagi, H. Yuki, T. Baba et al., *J. Phys. Soc. Jpn.* **71**, 2881 (2002).