ЖУРНАЛ ФИЗИЧЕСКОЙ ХИМИИ, 2023, том 97, № 7, с. 915–924

ПРОБЛЕМЫ, ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ И АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ФИЗИЧЕСКОЙ ХИМИИ

УДК 541.124

ИНИЦИИРОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ ПРИМЕСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СВИНЦОВОМ КАТОДЕ В УСЛОВИЯХ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

© 2023 г. С. Ф. Тимашев[a], И. Б. Савватимова[a], С. С. Потешин[a], С. М. Рындя[a,*], Н. И. Каргин[a]

[a]*Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, Россия*

******e-mail: serget@mail.ru*

Поступила в редакцию 04.12.2022 г.
После доработки 04.12.2022 г.
Принята к публикации 12.12.2022 г.

Показана возможность инициирования в Pb-катоде при тлеющем разряде в низкотемпературной дейтерий-содержащей неравновесной плазме ядерно-химических процессов, приводящих к существенному (в разы) уменьшению содержания изотопов одних примесных элементов (конкретно, Zn) и возрастанию других (конкретно, W, Fe, Mn и Al). Такие процессы могут быть поняты при введении представлений о существовании в ядерной материи метастабильных ненуклонных возбуждений "внутренней встряски" (*isu*-состояния), образующихся при инициирующих воздействиях на ядра электронов с высокой (по "химическим" масштабам) кинетической энергией $E_e \sim 3–5$ эВ.

Ключевые слова: ядерно-химические процессы, низкотемпературная дейтерий-содержащая неравновесная плазма, искусственная радиоактивность, метастабильные ненуклонные возбуждения ядерной материи

DOI: 10.31857/S0044453723070282, **EDN:** SOOTWO

В работе [1] было показано, что при воздействии потоков неравновесной низкотемпературной дейтеро- и протий-содержащей плазмы тлеющего разряда на металлические катоды инициируется искусственная радиоактивность исходно нерадиоактивных изотопов, входящих в состав катодов. В частности, под воздействием в течение 40 часов потоков дейтеро-содержащей плазмы на Pd-катод содержание в нем примесных изотопов Pb и Pt с исходных величин ~0.5 ат. % уменьшалось на 2 порядка и более для изотопов Pb, и примерно в три раза – для примесных изотопов Pt. При этом фиксировались относительно небольшие (~1–2%) изменения массовых долей изотопов указанных примесных элементов. Наиболее показательный пример фиксируемых изменений – образование в Pd-катоде при воздействии дейтерий-содержащей плазмы стабильных изотопов W, содержание которых в исходных образцах Pd-катода было на уровне фона. Согласно данным масс-спектрометрического анализа (использовался прибор ICP MS для изотопного и элементного анализа ELAN DRC-e с установкой лазерной абляции UP-213), вольфрам в Pd-катоде продуцировался в количестве, сопоставимом с количеством убывших изотопов Pb и Pt, если ориентироваться на числа импульсов, соответствующие изотопам для каждого из указанных элементов – Pb, Pt и W.

Для понимания полученных результатов были введены новые для ядерной физики представления о возможности существования в ядерной материи ненуклонных метастабильных возбуждений, инициированных взаимодействием с ядрами электронов высоких (по химическим масштабам) энергий $E_e \sim 3–5$ эВ [2–4]. Полагалось, что если исходное ядро ${}^{A}_{Z}\mathrm{N}$ (Z и A – порядковый номер и массовое число ядра N соответственно) не претерпевает K-захват, то взаимодействие электрона указанных энергий с приповерхностной областью ядра приводит к испусканию нейтрино и образованию векторного W^- бозона, при взаимодействии которого с u-кварком одного из протонов ядерной материи образуется d-кварк, но нейтрон при этом в ядерной материи не образуется из-за дефицита массы для такого изотопа. Поэтому нуклонная структура ядра M, образующегося при таком процессе:

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{N} + \mathrm{e}^-_{\mathrm{he}} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}\mathrm{M}_{\mathrm{isu}} + \nu, \qquad (1) $$

локально нарушена, и ядро M оказывается в метастабильном состоянии "внутренней встряски" ("inner shake-up" или isu-состояние). Нижний

индекс при записи электрона в левой части (1) указывает (high energy) на активируемый характер этой стадии процесса, а нижний индекс в обозначении ядра в правой части соотношения (1) указывает на его метастабильное состояние.

Последующий релаксационный распад такого ядра (эти ядра определяются как β-ядра):

$$ {}^{A}_{Z-1}\mathrm{M}_{\mathrm{isu}} \rightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{N} + \mathrm{e}^{-} + \tilde{\nu}, \qquad (2) $$

как и реакция (1), определяется слабыми ядерными взаимодействиями [2–4]. По этой причине общий процесс рассматриваемого инициирования ядра и последующего β-распада ядра в isu-состоянии представляет собой неупругое рассеяние электрона на ядре по каналу слабого взаимодействия с испусканием нейтрино-антинейтринной пары. Энергетический порог такого процесса составляет 0.3 эВ [5]. Именно с последней величиной связаны указанные величины E_e кинетической энергии электронов в неравновесной низкотемпературной плазме, достаточные для реализации рассматриваемых в [1–4] ядерно-химических превращений или низкоэнергетических ядерных реакций (Low Energy Nuclear Reactions, LENR), как такие процессы часто определяют [6–10]. При повышении кинетической энергии электронов выше указанных значений вероятность инициирования рассматриваемых ядерно-химических процессов уменьшается из-за преимущественных потерь энергии электронов в плазме на процессы ионизации атомов и ионов.

Хорошо известно, что для ядерных реакций, инициируемых протонами или α-частицами, требуются кинетические энергии этих частиц, на 6 порядков превышающих энергии E_e электронов в неравновесной низкотемпературной плазме, что связано с необходимостью для преодоления возникающих кулоновских барьеров протонами и α-частицами. Именно введение представлений о существовании ненуклонных метастабильных возбуждений в ядерной материи является основой для понимания физической сущности ядерно-химических превращений в условиях протий- или дейтерий-содержащей плазмы тлеющего разряда, когда реализуется более мягкий вариант контролируемого воздействия на состояние ядерной материи и ядерные процессы. Действительно, при взаимодействии высокоэнергетических электронов с протонами ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$, дейтронами ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ или ядрами трития ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$ образуются, в соответствии с (1), простейшие β-ядра, каковыми являются β-нейтрон ${}^{1}\mathrm{n}_{\mathrm{isu}}$, β-динейтрон ${}^{2}\mathrm{n}_{\mathrm{isu}}$ и β-тритрон ${}^{3}\mathrm{n}_{\mathrm{isu}}$, а для таких ядер какие-либо барьеры отсутствуют. Поскольку массы ядер ${}^{1}\mathrm{n}_{\mathrm{isu}}$, ${}^{2}\mathrm{n}_{\mathrm{isu}}$ и ${}^{3}\mathrm{n}_{\mathrm{isu}}$ равны, соответственно, массам атомов протия, дейтерия и трития, то их дефекты масс принимаются равными $\Delta_1 = 7.289$ МэВ, $\Delta_2 = 13.136$ МэВ и $\Delta_3 = 14.950$ МэВ, соответственно. При этом массы ядер ${}^{1}\mathrm{n}_{\mathrm{isu}}$, ${}^{2}\mathrm{n}_{\mathrm{isu}}$ и ${}^{3}\mathrm{n}_{\mathrm{isu}}$ принимаются равными массам соответствующих атомов H-1, H-2 и H-3 (см., например, табл. 2 в [11]). Более того, в соответствии с экспериментальными результатам работы [1], составные “материнские” ядра, образующиеся при слиянии ядер ${}^{1}\mathrm{n}_{\mathrm{isu}}$, ${}^{2}\mathrm{n}_{\mathrm{isu}}$ и ${}^{3}\mathrm{n}_{\mathrm{isu}}$ с рассматриваемыми ядрами-мишенями, тоже оказываются β-ядрами в разбалансированном isu-состоянии с потерей устойчивости. Динамика распада таких ядер высоко специфична. И именно вследствие нарушения нуклонной структуры релаксационная перестройка ядерной материи таких материнских ядер в процессе образования продуктов ядерных превращений сопровождается не путем испускания гамма-квантов, как это имеет место при протон-нейтронной организации ядерной материи, а при определяющей роли слабых ядерных взаимодействиях – путем испускания нейтрино-антинейтринных пар, или UR-CA-процесса Гамова–Шёнберга [12]. Поэтому такие ядерные процессы оказываются безопасными для окружения.

Задача данной работы изначально состояла в уточнении механизма одного из наблюдаемых в работе [1] феноменов – образования изотопов W в Pd-катоде, содержащем примесные элементы Pb и Pt, при воздействии на него дейтерий-содержащих потоков низкотемпературной неравновесной плазмы тлеющего разряда. С этой целью планировалось исследовать изменения изотопного состава Pb-катода, прошедшего 44-часовую обработку в условиях тлеющего разряда. Однако при выполнении данного исследования выяснилось, что примесные изотопы Zn, содержащиеся в исходном Pb-катоде, в условиях плазменной обработки также могли активироваться и продуцировать радиоактивные элементы. Естественно, пройти мимо возможности расширить исследование феномена искусственной радиоактивности, инициированной в условиях низкотемпературной неравновесной плазмы тлеющего разряда, авторы не могли.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальная установка тлеющего разряда и параметры низкотемпературной дейтерий-содержащей неравновесной плазмы, формирующейся в рабочем объеме установки, описаны в работе [1]. Температура плазмы по газовым компонентам составляла 6000–8000°C. Методика изотопного и элементного анализа Pb-образцов (использовались свинцовые диски диаметром 20 мм и толщиной 1.5 мм) при использовании ICP масс-спектрометра ELAN DRC-e (Perkin Elmer,

Таблица 1. Числа импульсов и соотношения изотопов Pb после обработки на катоде в дейтериевой плазме

A			204	206	207	208
Природное содержание изотопа, %			1.4	24.1	22.1	52.4
Исходный	29-03-22 Pb-ini #04	%	1.3	24.0	21.4	53.3
		Общее число 803453654	23584924	432292619	385557379	962018732
Дейтериевая плазма	29-03-22 Pb-13 scr #08	%	1.3	24.3	21.4	53.0
		Общее число 1355566001	17932166	329600532	290510717	717522586
	30-05-22 Pb-13#14	%	1.3	24.4	21.3	53.0
		Общее число 809235948	10546891	197815546	172369564	428503947
	29-03-22 Pb13-kr 04-07*	%	1.2	23.9	21.3	53.6
		Общее число 786118180	9781454	187826988	167275095	421234643
	29-03-22 Pb_13kr#04	%	1.3	24.3	21.4	53.0
		Общее число 1133647341	15298586	275052937	242570294	600725524
Плазма Обратная сторона	30-05-22 Pb-13_ obr#06	%	1.3	24.8	21.7	52.2
		Общее число 4845119274	65558278	1201194973	1049916590	2528449433
	22-04-22 Pb-13_ obr#04	%	1.3	24.3	21.4	53.0
		Общее число 1572723811	21119691	381637096	336280883	833686141

* Усредненные данные по содержанию изотопов для 4-х областей анализа поверхности.

Канада) с установкой лазерной абляции UP-213 (New Wave Research, США) для получения проб элементного состава при сканировании приповерхностных участков исследуемых исходных, а также прошедших плазменную обработку образцов (обычно выбирались участки 6×1 мм^2) также представлена в работе [1]. В ряде случаев элементный и изотопный состав образцов исследовался с обеих сторон – со стороны воздействия плазмы и с противоположной стороны, прямое воздействие на которую со стороны плазмы исключалось. Размер сфокусированного пятна на образце при абляции составлял ~ 80 мкм, плотность мощности в импульсе ~ $1–3 \times 10^9$ Вт/см^2.

Помимо исходного изотопного состава Pb как базового элемента и изменений изотопного состава, инициированных потоками неравновесной низкотемпературной плазмы тлеющего разряда, исследовались изменения изотопного состава ряда примесных элементов. При этом используется двухрежимный (счетный и аналоговый) детектор с автоматическим выбором режима работы с рабочим линейным диапазоном более 9 порядков. Фактически, на выходе представляются таблицы чисел импульсов в секунду, фиксируемых для каждого из определяемых (по задаваемой программе) “массовых чисел” – отношений m_i/Z_i, где m_i и Z_i – масса и заряд i-го иона. Иногда, при числе импульсов более 10^9 – при “зашкаливании” детектора, плотность мощности в импульсе при абляции приходилось уменьшать (до 35–50%). В качестве основных примесных элементов в исходных образцах Pb фиксировались Fe (~0.1 ат. %), а также W, Zn, Al и Mg, содержание каждого из которых составляло порядка ~0.01 ат. %. При этом каждый проводимый анализ состава Pb-образца основывался на результатах статистической обработки 15 последовательных проб, которые формируются при лазерной абляции.

Поскольку задача данного исследования состояла в инициировании искусственной радиоактивности стабильных изотопов, исходное соотношение которых оказывалось близким природным соотношениям (см. ниже приводимые табл. 1–4), то при каждом проводимом анализе состава Pb-образца не возникало проблем идентификации изотопов и установления изменений долей изотопов как до, так и после обработки в тлеющем разряде. Статистические ошибки для значений фиксируемых изотопных отношений не превышали 0.5% для базового элемента Pb, а для при-

Таблица 2. Числа импульсов и соотношения изотопов $^{A}_{74}$W в Pb после обработки на катоде в дейтериевой плазме (полагается, что 0.1% общего числа импульсов приходится на изотоп W-180)

A (99.9%*)			182	183	184	186
Природное содержание изотопа, %			26.5	14.3	30.7	28.4
Исходный*		%	25.9	14.1	30.1	29.8
		Общее число				
		114424	29704	16084	34510	34126
Дейтериевая плазма	24-03-22 Pb13-#02	%	25.8	14.2	30.7	29.2
		Общее число				
		586906	151475	83518	180130	171783
	29-03-22 Pb13-#04	%	26.3	14.3	30.3	29.0
		Общее число				
		154520	40610	22157	46934	44819
	29-03-22 Pb13-#08	%	25.9	14.3	30.7	29.0
		Общее число				
		2676060	693681	382682	822045	777652
	29-03-22 Pb13- #05	%	26.0	14.1	30.7	29.1
		Общее число				
		674436	175718	95426	207128	196164
	24-03-22 Pb13- #07	%	25.9	14.2	30.7	29.1
		Общее число				
		112817	29229	16051	34711	32826
	24-03-22 Pb- sc#2	%	25.8	14.1	30.6	29.4
		Общее число				
		879093	151266	83308	179919	171569

* Усредненные данные по содержанию изотопов для шести областей анализа поверхности исходного образца

месных элементов варьировались от долей процента до 1–3%.

При этом, однако, числа импульсов в секунду, фиксируемых для изотопов конкретного элемента, могли заметно (до ~50% и более) отличаться, что связывалось не столько с флуктуациями примесного состава образцов, сколько с сильно нестационарным характером создаваемого тлеющего разряда и проявляющимися вследствие этого локальными различиями в степени неравновесности электронов в плазменных потоках, что частично инициируется неизбежной структурной гетерогенностью Pb-образцов. Это демонстрируется, в частности, на рис. 4б работы [1], где показаны интенсивно светящиеся пятна на катоде, указывающие на локальные изменения режима тлеющего разряда с переходом к локальному "коронному" разряду. Отчасти на регистрируемые числа импульсов могли также влиять возможные различия в режимах лазерной абляции при проводимых анализах из-за неизбежных вариаций в составе используемого аргона.

Однако для нашей цели установления возможности инициирования в Pb-катоде в условиях тлеющего разряда ядерных процессов, приводящих, как следует из приводимых ниже табл. 1–4, к существенному (в разы) уменьшению содержания изотопов одних примесных элементов (конкретно Zn) и возрастанию других (конкретно W, Fe, Mn и Al), такие указанные вариации в фиксируемом локальном содержании изотопов примесных элементов не влияли на базовые заключения об изменениях содержания примесных элементов. Для установления элементного и изотопного состава исходного образца Pb, а также образца, прошедшего плазменную обработку в течение 44 ч, проводилось не менее 5–8 анализов по каждому элементу. В представленных таблицах приведены данные по количеству импульсов, фиксируемых при масс-спектрометрическом анализе для разных изотопов при нескольких анализах в разные дни (для иллюстрации фиксируемых разбросов).

Небольшие комментарии к приводимым таблицам. При получении данных табл. 1 по изотопному составу базового элемента Pb в исходном образце необходимо было понизить на 50% мощность лазерных импульсов при абляции из-за "зашкаливания" детектора при фиксации числа импульсов, соответствующих изотопу Pb-208. В то

Таблица 3. Числа импульсов и соотношения изотопов Zn в Pb после обработки на катоде в дейтериевой плазме

A (100%)			64	66	67	68	70
Природное содержание изотопа, %			48.6	27.9	4.1	18.8	0.6
Исходный	29.03-22 Pb ini_#03-04	%	48.4	28.1	4.5	18.5	0.5
		Общее число 261344	126598	73300	11836	48395	1215
Дейтериевая плазма	29.03-22 Pb13_kr#04	%	55.5	30.6	4.4	9.4	0.1
		Общее число 14383	7981	4398	640	1350	14
	29.03-22 Pb13 scr#03	%	45.3	33.2	4.4	17.0	0.1
		Общее число 19663	8911	6524	875	3343	10
	29.03-22 Pb13_kr#05	%	56.7	32.0	4.8	6.5	0.1
		Общее число 8373	4748	2677	403	543	2
	30-05-22 Pb-13#14	%	52.9	15.8	27.2	3.8	0.3
		Общее число 13248	7004	2098	3603	506	37
Плазма Обратная сторона	24-03-22 Pb-13 obr#1	%	47.3	27.0	4.4	19.9	1.4
		Общее число 45332	21471	12232	1995	9016	628
	24-03-22 Pb-13_obr#2	%	46.7	28.6	4.2	19.7	0.8
		Общее число 127632	59609	36416	5376	25188	1043

Таблица 4. Числа импульсов и соотношения примесных изотопов в Pb после обработки на катоде в дейтериевой плазме

Pb	Образцы	Mg-24	Al-27	Mn-55	Fe-56	Fe-57
Исходный образец	Pb-ini	194120*	203644*	13392**	1946536**	24267**
Дейтериевая плазма	29-03-22 Pb13scr#08			81237	9160589	221336
	30-05-22 Pb-13 #13	18027	753785	92995	13941725	349821
	30-05-22 Pb-13 #14	10152	776675		12256521	300689
	24-03-22 Pb13_#01			487535	55524676	1295004
	30-05-22 Pb-13_ #06	47763	789379		16606463	411169
Плазма Обратная сторона	24-03-22 Pb13_obr#01			377113	49520637	1119953

* Усредненные данные по исходному содержанию изотопов на трех участках поверхности 5-6-7: Pb-ini. 22-04-22_#5-6-7.

** Данные по участку поверхности: Исх край 24.03_Pb-ini.

же время такой проблемы не возникло при получении данных по изотопному составу Pb с “обратной” стороны образца, подвергнутого плазменной обработке, что нашло отражение в существенной (в 2.7 раза) разнице фиксируемого общего числа чисел импульсов изотопов. Естественно было связывать данное различие с большей дефектностью поверхности Pb-образца, подвергаемой плазменной обработке.

Другой аспект работы связан с обнаружением понижения на порядок и более содержания примеси Zn, исходно существовавшей в образцах Pb на уровне ~0.01% примеси (табл. 3). В связи с этим возникает естественный вопрос: какие при уменьшении содержания Zn продуцируются новые элементы (конкретные изотопы), возрастающее содержание которых в образцах Pb после плазменной обработки может стать необходимым аргументом для понимания наблюдаемого феномена. Разработанные в [1] представления о природе инициирования процессов искусственной радиоактивности в условиях дейтерий-содержа-

щей низкотемпературной неравновесной плазмы позволили установить возможные совокупности таких изотопов, ориентируясь на данные масс-спектрометрического анализа. Соответствующие данные, как будет видно из последующего, представлены в табл. 4.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В рамках представлений, развитых в [1], при взаимодействии нейтральных ядер $^{2}n_{isu}$ с ядрами Pb и ядрами примесных элементов происходит слияние ядерной материи этих ядер с формированием составного ядра с нарушенной нуклонной структурой (isu-состояние) в возбужденном состоянии. Общая энергия возникшего ядра перераспределяется по его объему посредством векторных бозонов, инициируя образование нуклонной структуры дочерних ядер и испускание части энергии в виде $\nu\tilde{\nu}$ пар в соответствии с законами сохранения энергии и импульса. Естественно, что основные взаимодействия ядер $^{2}n_{isu}$ происходят с изотопами Pb. Это, прежде всего, процессы взаимных превращений стабильных изотопов (звездочка указывает на возбуждение образующегося составного ядра):

$$^{A}_{82}\mathrm{Pb} + {}^{2}\mathrm{n}_{isu} \rightarrow {}^{A+2}_{82}\mathrm{Pb}^{*} \rightarrow {}^{A+2}_{82}\mathrm{Pb} + \nu\tilde{\nu} + Q_A, \quad (3)$$

где A = 204 и 206, а величины энерговыделений при образовании изотопов с массовыми числами A = 204 и 206 равны, соответственно, Q_A = 11.81 и 11.10 МэВ, а также:

$$^{A}_{82}\mathrm{Pb} + {}^{2}\mathrm{n}_{isu} \rightarrow {}^{A+2}_{82}\mathrm{Pb}^{*} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{A-2}_{82}\mathrm{Pb} + 2\mathrm{e}^{-} + 2\tilde{\nu} + \nu\tilde{\nu} + Q_A, \quad (4)$$

где A = 206 и 208, а величины энерговыделений при образовании изотопов с массовыми числами A = 204 и 206 равны, соответственно, Q_A = 11.93 и 12.75 МэВ.

При взаимодействии ядер $^{2}n_{isu}$ с изотопами Pb могут продуцироваться и новые элементы. Прежде всего, это изотопы W, рождение которых было обнаружено в работе [1], где образование изотопов W связывалось с инициируемым распадом примесных изотопов Pb и Pt. Поскольку в условиях воздействия потоков низкотемпературной дейтерий-содержащей неравновесной плазмы на Pb-катод образования изотопов Pt не зафиксировано, естественно было представить ядерно-химический процесс непосредственного образования изотопов W при инициировании изотопов Pb. При этом следует обратить внимание (см. табл. 2) на фиксируемую неоднородность содержания изотопов W, образующихся в образце Pb как катоде после длительной обработки в условиях тлеющего разряда. Наряду с зонами анализа приповерхностной области образца (участки “29-03_Pb13_kr#05”, “24-03_Pb13_kr_sc2”, “12-05_Pb13#11”), на которых содержание изотопов W превосходит исходное (до плазменной обработки) содержание таких изотопов от 6 до 28 раз, имеются участки (“24-03_Pb13_kr_#07”, “12-05_Pb13kr#04”), на которых содержание изотопов W практически не изменилось после обработки в плазме. Как отмечалось выше, такую неоднородность по образцу естественно связывать с формирующейся при плазменной обработке структурной гетерогенностью образца, в частности, в области границы образца с молибденовым держателем, экранирующим часть Pb-образца. На последнее указывает формирование локальных областей интенсивного “коронного” разряда на границах зоны разряда. Необходимо также указать, что образование изотопов W было зафиксировано на отдельных небольших участках поверхности с “обратной” стороны образца, причем, в относительно больших количествах (“12-05_ Pb13_ obr#01”). Как будет показано ниже, последний феномен оказывается крайне важным для понимания природы исследуемого в данной работе механизма ядерных превращений, инициируемых в условиях низкотемпературной дейтерий-содержащей неравновесной плазмы тлеющего разряда.

Ориентируясь на данные, представленные в табл. 4, согласно которым в Pb-катоде после обработки в дейтерий-содержащей плазме тлеющего разряда возрастает содержание изотопа Al-27 и уменьшается содержание Mg-24, полагаем, что образование изотопов W-182 и W-183 в условиях воздействия на Pb-катод плазменных потоков может происходить в соответствии с процессом:

$$^{A}_{82}\mathrm{Pb} + {}^{2}\mathrm{n}_{isu} \rightarrow {}^{A+2}_{82}\mathrm{Pb}^{*}_{isu} \rightarrow {}^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{A-25}_{74}\mathrm{W} + 5\mathrm{e}^{-} + 5\tilde{\nu} + \nu\tilde{\nu} + Q_A, \quad (5)$$

где A = 207 и 208, так что Q_{207} = 56.11 МэВ и Q_{208} = = 54.93 МэВ. Но как можно понять образование изотопов W-184 и W-186, если при проведении эксперимента содержание изотопа магния-24 падало, что указывало на нереализуемость процесса:

$$^{A}_{82}\mathrm{Pb} + {}^{2}\mathrm{n}_{isu} \rightarrow {}^{A+2}_{82}\mathrm{Pb}^{*}_{isu} \rightarrow {}^{24}_{12}\mathrm{Mg} + {}^{A-22}_{74}\mathrm{W} + 4\mathrm{e}^{-} + 4\tilde{\nu} + \nu\tilde{\nu} + Q_A, \quad (6)$$

где A = 204, 206 и 208, так что Q_{204} = 50.19 МэВ, Q_{206} = 48.97 МэВ и Q_{208} = 47.82 МэВ.

Поэтому в качестве возможного варианта образования изотопов W-182, W-184 и W-186 могут рассматриваться процессы:

$$^{A}_{82}\mathrm{Pb} + {}^{2}\mathrm{n}_{isu} \rightarrow {}^{A+2}_{82}\mathrm{Pb}^{*}_{isu} \rightarrow 2\,{}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{A-22}_{74}\mathrm{W} + 4\mathrm{e}^{-} + 4\tilde{\nu} + \nu\tilde{\nu} + \tilde{Q}_A, \quad (6a)$$

где A = 204, 206 и 208, так что $\tilde{Q}_{204}$ = 36.26 МэВ, $\tilde{Q}_{206}$ = 35.04 МэВ и $\tilde{Q}_{208}$ = 33.88 МэВ.

Возможен и иной вариант гипотетических процессов с образования изотопов W-184 и W-186. В связи с введением [1] в рассмотрение нейтроноподобных $^{1}n_{isu}$, $^{2}n_{isu}$ и $^{3}n_{isu}$ частиц, позволяющих понять физические причины инициирования низкоэнергетических ядерно-химических процессов, следует обратить внимание на обсуждаемую в литературе возможность образования в ядерных процессах ассоциатов нейтронов [13]. В качестве примера приведем относительно недавние экспериментальные данные [14] о проявлении ядерно-химической активности ядерно-стабильных мультинейтронов ^{x}n с $x \geq 6$, которые были обнаружены среди продуктов деления ядер $^{238}_{92}$U, облучаемых α-частицами с энергией 62 МэВ. Детектирование мультинейтронов осуществлялось по характерным γ-квантам, излучаемым ядрами при фиксируемой экспериментально цепочке β-распадов: ^{28}Mg → ^{28}Al → ^{28}Si. Материнское ядро ^{28}Mg с периодом полураспада 20.915 ч в этой цепочке могло образоваться при взаимодействии мультинейтронов с ядрами специально помещаемого в рабочую камеру с $^{238}_{92}$U моноизотопа ^{27}Al: $^{27}\mathrm{Al} + {}^{x}\mathrm{n} \rightarrow {}^{28}\mathrm{Mg} + (x-2)n + p$. В γ-спектрах облученного продуктами деления $^{238}_{92}$U образца ^{27}Al наблюдались линии с энергиями квантов 1342 и 1779 кэВ, сопровождающих β-распад ядер ^{28}Mg и ^{28}Al, соответственно. Спад активности в пределах точности измерений совпадал с периодом полураспада ^{28}Mg, $T_{1/2}$ ~ 21 ч, что свидетельствовало об обнаружении ядерно-стабильных мультинейтронов ^{x}n с $x \geq 6$.

Аналогичные результаты, демонстрирующие возможность передачи ядру-мишени одновременно до 12 нуклонов, были получены в работах [15, 16], в которых в условиях диффузионного переноса дейтерия из газовой фазы (1 атм) в вакуумную камеру через многослойную тонкую пленку Pd/CaO/Pd одновременно с диффузией D в атомарной форме осуществлялся диффузионный перенос (в течение 1 недели при 343 K) тяжелых атомов, если на поверхность этой пленки со стороны газовой фазы D_2 наносился один из тяжелых изотопов: Sr-88, Cs-133, Ba-137, Ba-138, W-182 и W-184. После завершения эксперимента на поверхности системы со стороны вакуума были зафиксированы, в соответствии с указанным выше набором изотопов, изотопы Mo-96, Pr-141, Sm-149, Sm-150, Pt-190 и Os-188. Хотя механизм происходящих превращений в указанных работах не обсуждался, сам факт одновременной передачи исходным изотопам от 8 до 12 нуклонов при диффузионном переносе через указанную тонкую пленку открывает определенные возможности для поиска возможных механизмов такой множественной передачи нуклонов.

Несомненно, важным фактором для понимания такого феномена являются особенности структуры формируемой системы. На Pd пластинку толщиной 0.1 мм наносилось при распылении потоком ионов аргона последовательно пять бислоев CaO (2 нм)-Pd (18 нм), на которые потом наносился слой Pd толщиной 40 нм. Именно на этот слой, обращенный к газовой фазе D_2, наносились в разных экспериментах указанные выше изотопы.

Как указывалось в работах [15, 16], выбор CaO в наносимых бислоях определялся относительно низкой величиной работы выхода (1.60–1.86 эВ) электрона из оксида кальция, тогда как соответствующая величина для Pd составляет около 5 эВ. Это означает, что при создании условий сильного неравновесия по электронной подсистеме в области межфазной границы CaO/Pd могут инжектироваться (выходить в Pd-фазу) “горячие” электроны с кинетической энергией E_e ~ 3 эВ. Согласно [1–4], именно при взаимодействии электронов таких энергий с диффундирующими дейтронами d^+, могут эффективно образовываться нейтральные ядра $^{2}n_{isu}$:

$$d^+ + e^-_{he} \rightarrow {}^{2}n_{isu} + \nu. \qquad (1a)$$

Очевидно, что инициирование таких процессов на межфазных границах CaO/Pd в рассматриваемой системе Pd/CaO/Pd возможно лишь при достаточно интенсивном диффузионном переносе ионов d^+, когда может достигаться указанное сильное неравновесие по электронной подсистеме и перенос электронов в режиме инжекции через указанные межфазные границы. Именно при таких условиях можно ожидать, что в диффузионном переносе через многослойную тонкую пленку Pd/CaO/Pd участвуют не ионы d^+, сопровождаемые электронами, как обычно полагается [15, 16], а нейтральные ядра $^{2}n_{isu}$.

Более того, результаты работ [15, 16] дают основания полагать, что при таком диффузионном переносе ядра $^{2}n_{isu}$ могут формировать более крупные ассоциаты $^{x}n_{isu}$ с $x \geq 4$, и именно такие ассоциаты могут взаимодействовать с ядрами диффундирующих тяжелых изотопов. Как было показано в [1], введение в рассмотрение ассоциатов $^{x}n_{isu}$ (x = 1, 2 и 3) нейтроноподобных частиц $^{1}n_{isu}$, масса которых на 0.78 МэВ/c^2 меньше массы нейтронов n, заставляет более внимательно проанализировать феномен образования нейтронов

в разнообразных процессах, начиная с работ группы Арцимовича [17, 18] начала 50-х годов прошлого века по детектированию нейтронов при образовании пинча в дейтерий-содержащей низкотемпературной плазме. Обращалось внимание на работу Климова с сотр. [19], в которой при создании пульсирующих разрядов в вихревом плазменном реакторе регистрировались частицы, хотя и определяемые в названии статьи [19] как нейтроны, но все же отличающиеся от них и представляемые авторами этой статьи как "нейтроноподобные". В работе [1] приводились аргументы, показывающие, что в экспериментах группы Климова [19] могли фиксироваться именно частицы $^{1}n_{isu}$.

Обсуждаемая в [1] возможность существования ассоциатов $^{x}n_{isu}$ (x = 1, 2 и 3) не исключала возможности формирования и более крупных ассоциатов. Если в условиях экспериментов [14] при выявлении ассоциатов нейтральных частиц в продуктах деления ядер $^{238}_{92}U$, облучаемых α-частицами с энергией 62 МэВ, степень неравновесности образующихся продуктов могла быть достаточно высока, и ассоциаты ^{x}n нейтронов могли формироваться, то в экспериментах [15, 16] такую вероятность практически следует исключить. Поэтому будем полагать, что процессы одновременной передачи изотопам указанных тяжелых элементов от 8 до 12 нуклонов реализуются при формировании в системе Pd/CaO/Pd именно ассоциатов $^{A}n_{isu}$ и слиянии в квазиравновесных условиях таких ассоциатов с диффундирующими тяжелыми частицами. В условиях [15, 16] могли, в частности, реализоваться процессы (при расчете энерговыделений не учтены энергии связей субъединиц в ассоциатах $^{A}n_{isu}$, величины которых могут быть порядка 1 МэВ) :

$$^{88}_{38}Sr + {}^{8}n_{isu} \rightarrow {}^{96}_{38}Sr^{*}_{isu} \rightarrow {}^{96}_{42}Mo + 4e^{-} + 4\tilde{\nu} + \nu\tilde{\nu} + Q(43.91\ \text{МэВ}), \quad (7)$$

$$^{133}_{55}Cs + {}^{8}n_{isu} \rightarrow {}^{141}_{55}Cs^{*}_{isu} \rightarrow {}^{141}_{59}Pr + 4e^{-} + 4\tilde{\nu} + \nu\tilde{\nu} + Q(40.99\ \text{МэВ}), \quad (8)$$

$$^{137}_{56}Ba + {}^{12}n_{isu} \rightarrow {}^{149}_{56}Ba^{*}_{isu} \rightarrow {}^{149}_{62}Sm + 6e^{-} + 6\tilde{\nu} + \nu\tilde{\nu} + Q(49.23\ \text{МэВ}), \quad (9)$$

$$^{138}_{56}Ba + {}^{12}n_{isu} \rightarrow {}^{150}_{56}Ba^{*}_{isu} \rightarrow {}^{150}_{62}Sm + 6e^{-} + 6\tilde{\nu} + \nu\tilde{\nu} + Q(48.60\ \text{МэВ}), \quad (10)$$

$$^{182}_{74}W + {}^{8}n_{isu} \rightarrow {}^{190}_{74}W^{*}_{isu} \rightarrow {}^{190}_{78}Pt + 4e^{-} + 4\tilde{\nu} + \nu\tilde{\nu} + Q(33.12\ \text{МэВ}), \quad (11)$$

$$^{184}_{74}W + {}^{4}n_{isu} \rightarrow {}^{188}_{74}W^{*}_{isu} \rightarrow {}^{188}_{76}Os + 2e^{-} + 2\tilde{\nu} + \nu\tilde{\nu} + Q(17.67\ \text{МэВ}). \quad (12)$$

Здесь полагается, что величины Δ_A дефектов масс ядер $^{4}n_{isu}$, $^{8}n_{isu}$ и $^{12}n_{isu}$ равны 22.239, 43.036 и 59.800 МэВ соответственно. При этом для оценок принимается, что масса ядра $^{4}n_{isu}$ равна сумме масс ядер $^{3}n_{isu}$ и $^{1}n_{isu}$. Если же $^{4}n_{isu}$ представить как связанную ядерными силами пару ядер $^{2}n_{isu}$, то энергия связи такой пары окажется равной 3.69 МэВ. В этих представлениях ядро $^{2}n_{isu}$ можно рассматривать как связанную пару ядер $^{1}n_{isu}$ с энергией связи 1.44 МэВ. Априори принимается также, что ядра $^{8}n_{isu}$ рассматриваются здесь как слабо связанные две субъединицы $^{3}n_{isu}$ и $^{2}n_{isu}$, а $^{12}n_{isu}$ – как слабо связанные три субъединицы $^{3}n_{isu}$. Величины энерговыделений в реакциях (7)–(12), полученные как оценочные, дают основания рассматривать предлагаемые механизмы ядерных процессов с одновременной передачей нескольких нуклонов (аналог *r*-процессов в астрофизике) как возможные.

Вернемся к обсуждению вопроса о возможных процессах, которые определили проявление изотопов W-184 и W-186 в Pb-катоде после его обработки в условиях воздействия потоков низкотемпературной дейтерий-содержащей неравновесной плазмы. Естественно полагать, что ассоциаты $^{A}n_{isu}$, для которых $A \geq 3$, могли формироваться и в рассматриваемых условиях дейтерий-содержащей неравновесной плазмы тлеющего разряда, заведомо более интенсивных, нежели в работах [15, 16], и изотопы W-184 и W-186 могли образовываться при слиянии таких ассоциатов $^{A}n_{isu}$ с изотопами Pb-207 и Pb-208:

$$^{207}_{82}Pb + {}^{4}n_{isu} \rightarrow {}^{211}_{82}Pb^{*}_{isu} \rightarrow {}^{27}_{13}Al + {}^{184}_{74}W + 5e^{-} + 5\tilde{\nu} + \nu\tilde{\nu} + Q(62.67\ \text{МэВ}), \quad (13)$$

$$^{208}_{82}Pb + {}^{5}n_{isu} \rightarrow {}^{213}_{82}Pb^{*}_{isu} \rightarrow {}^{27}_{13}Al + {}^{186}_{74}W + 5e^{-} + 5\tilde{\nu} + \nu\tilde{\nu} + Q(66.03\ \text{МэВ}). \quad (14)$$

В связи с данными, представленными в табл. 4, возникает вопрос, в каких ядерно-химических процессах, инициируемых в Pb-катоде при воздействии на катод потоков неравновесной дейтерий-содержащей плазмы, могут рождаться изотопы Fe-56 и Fe-57, а также Mn-55. Достаточно определенно можно связывать образование части указанных изотопов с инициированными распадами изотопов Zn, которые, как следует из представленной табл. 3, фиксируются в исходном об-

разце Pb-катода и содержание которых в исследуемом образце катода значительно уменьшается после 44 часовой обработки катода в условиях тлеющего разряда. Совокупность соответствующих ядерно-химических процессов можно представить следующим образом:

$$^{64}_{30}\mathrm{Zn} + {}^{2}\mathrm{n}_{\mathrm{isu}} \rightarrow {}^{66}_{30}\mathrm{Zn}^{*}_{\mathrm{isu}} \rightarrow {}^{54}_{26}\mathrm{Fe} + {}^{12}_{6}\mathrm{C} + 2e^{-} + 2\tilde{\nu} + \nu\tilde{\nu} + Q_A\,(9.21\ \text{МэВ}), \quad (15)$$

$$^{66}_{30}\mathrm{Zn} + {}^{2}\mathrm{n}_{\mathrm{isu}} \rightarrow {}^{68}_{30}\mathrm{Zn}^{*}_{\mathrm{isu}} \rightarrow {}^{56}_{26}\mathrm{Fe} + {}^{12}_{6}\mathrm{C} + 2e^{-} + 2\tilde{\nu} + \nu\tilde{\nu} + Q_A\,(4.84\ \text{МэВ}), \quad (16)$$

$$^{67}_{30}\mathrm{Zn} + {}^{2}\mathrm{n}_{\mathrm{isu}} \rightarrow {}^{69}_{30}\mathrm{Zn}^{*}_{\mathrm{isu}} \rightarrow {}^{57}_{26}\mathrm{Fe} + {}^{12}_{6}\mathrm{C} + 2e^{-} + 2\tilde{\nu} + \nu\tilde{\nu} + Q_A\,(5.43\ \text{МэВ}), \quad (17)$$

$$^{68}_{30}\mathrm{Zn} + {}^{2}\mathrm{n}_{\mathrm{isu}} \rightarrow {}^{70}_{30}\mathrm{Zn}^{*}_{\mathrm{isu}} \rightarrow {}^{58}_{26}\mathrm{Fe} + {}^{12}_{6}\mathrm{C} + 2e^{-} + 2\tilde{\nu} + \nu\tilde{\nu} + Q_A\,(5.28\ \text{МэВ}). \quad (18)$$

Достаточно большое содержание образовавшихся в Pb-катоде изотопов Fe-56 и Fe-57, а также Mn-55 указывает на то, что изотопы Zn не являются единственным источником образования указанных изотопов в Pb-катоде. С этой точки зрения интерес могут представлять ядра с массовыми числами 116, 117, 118, 119, 120, 122 и 124, регистрируемые в исходном образце Pb-катода. При этом доля этих изотопов падает после обработки катода потоками дейтерий-содержащей плазмы. Скорее всего, в данном случае речь идет о примеси Sn в Pb-катоде. Однако, как следует из значений регистрируемых экспериментально соотношений изотопов указанных масс в исходном Pb-катоде, помимо Sn в Pb-катоде могут присутствовать примеси Cd-118, Te-120, Te-122, Te-124 и Xe-124. В связи с возникновением при этом ряда неопределенностей в выборе возможных механизмов ядерно-химических превращений, для установления всех вариантов продуцирования изотопов Fe-56, Fe-57 и Mn-55 в Pb-катоде после плазменной обработки требуются дополнительные исследования.

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Основной результат данного исследования – представление дополнительной косвенной информации о существовании в ядерной материи метастабильных ненуклонных возбуждений “внутренней встряски” (*isu*-состояния), образующихся при инициирующих воздействиях на ядра электронов с высокой (по “химическим” масштабам) кинетической энергией $E_{\mathrm{e}} \sim 3$–5 эВ. При слиянии простейших из таких ядер, в рассматриваемом случае – нейтральных ядер $^{A}\mathrm{n}_{\mathrm{isu}}$ с ядрами, имеющими обычную нуклонную структуру, формирующееся составное ядро оказывается в разбалансированном *isu*-состоянии и теряет устойчивость [2]. Именно это обстоятельство определяет последующую необычную (для ядерной физики) высоко специфическую динамику распада составного ядра, как это следует из работы [1] и результатов данной работы. Сам факт инициирования и реализации рассматриваемых ядерно-химических процессов по всему объему Pb-катода в данной работе указывает на то, что не только нейтральные ядра $^{2}\mathrm{n}_{\mathrm{isu}}$ с относительно длительными временами жизни (~10 мин [1–4]), но и ядра $^{A}\mathrm{n}_{\mathrm{isu}}$, для которых $A \geq 3$, диффузионным образом могут проникать на всю глубину Pb-катода (1.5 мм) и инициировать рассматриваемые процессы.

Поднимаемые вопросы лишь подчеркивают необходимость дальнейших усилий по прямому экспериментальному обнаружению метастабильных нейтральных ядер $^{A}\mathrm{n}_{\mathrm{isu}}$, на что указывалось в работе [1]. Это тем более важно, что понимание природы ядерно-химических процессов открывает новые возможности в решении ряда практических вопросов, включая переработку радиоактивных отходов [20], создание новых источников энергии. При решении последних вопросов следует иметь в виду, что именно вследствие нарушения нуклонной структуры релаксационная перестройка ядерной материи формируемых составных материнских ядер в процессе образования продуктов ядерных превращений сопровождается не процессами испускания гамма-квантов, как это имеет место при протон-нейтронной организации ядерной материи, а происходит при определяющей роли слабых ядерных взаимодействиях – с испусканием нейтрино-антинейтринных пар, при URCA-процессе Гамова–Шёнберга [12]. Поэтому такие ядерные процессы оказываются безопасными для окружения. Очевидно, что при реализации таких процессов возникают проблемы аккумулирования выделяющейся энергии, и поэтому в большей степени необходимо ориентироваться на поиск путей прямого извлечения электрической энергии, учитывая процессы разделения зарядов в инициируемой совокупности ядерно-химических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тимашев С.Ф., Савватимова И.Б., Потешин С.С. и др.* // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2022. Т. 53. Вып. 1. С. 110. https://doi.org/10.1134/S1063779622010051
2. *Тимашев С.Ф., Симакин А.В., Шафеев Г.А.* // Журн. физ. химии. 2014. Т. 88. № 11. С. 1805.
3. *Timashev S.* // Phys. Science Intern. J. 15 (2): 1–25, 2017; Article no. PSIJ.34889 ISSN: 2348-0130: http://www.sciencedomain.org/issue/2727.

4. *Тимашев С.Ф.* // РЭНСИТ. 2017. Т. 9. № 1. С. 37. http://rensit.ru/vypuski/article/200/9(1)37-51.pdf.
5. *Thomas S.A., Abdalla F.D., Lahav O.* // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 105. № 3. P. 031301. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.105.031301
6. *Barmina E.V., Sukhov I.A., Lepekhin N.M. et al.* // Quantum Electronics. 2013. V. 43. P. 591. https://doi.org/10.1070/QE2013v043n06ABEH014879
7. *Андреев С.Н., Шафеев Г.А.* // РЭНСИТ. 2017. Т. 9. № 1. С. 65. http://rensit.ru/vypuski/article/200/9(1)65-73.pdf.
8. *Simakin A.V., Shafeev G.A.* // Physics of Wave Phenomena. 2008. V. 16. № 4. P. 268. https://doi.org/10.3103/S1541308X08040031
9. *Karabut A.B., Kucherov Ya.R., Savvatimova I.B.* // Phys. Letters A. 1992. V. 170. P. 265.
10. *Savvatimova I.B.* // J. Condensed Matter Nuclear Sci. 2012. V. 6. P. 181. www.iscmns.org/CMNS/JCMNS-Vol6.pdf.
11. *Сафаров З.Х.* Физика атомного ядра и элементарных частиц. Казань: РИЦ “Школа”, 2008. 280 с.
12. *Lattimer J.M., Pethick C.J., Prakash M., Haensel P.* // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 66. P. 2701.
13. *Detraz C.* // Phys. Lett. B. 1977. V. 66. P. 333.
14. *Новацкий В.Г., Сакута С.Б., Степанов Д.Н.* // Письма в ЖЭТФ. Т. 98. Вып. 11. С. 747. https://doi.org/10.7868/S0370274X13230033
15. *Iwamura Y., Sakano M., Itoh T.* // Jpn. J. Appl. Phys. 2002. V. 41. P. 4642.
16. *Iwamura Y., Tsuruga S., Itoh T.* Deuterium Permeation Induced Transmutation Experiments using Nano-Structured Pd/CaO/Pd Multilayer Thin Film // 2014 CF/LANR(Cold Fusion / Lattice Assisted Nuclear Reactions). Colloquium at MIT, March. 21–23, 2014, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.
17. *Арцимович Л.А., Доброхотов Е.И., Лукьянов С.Ю. и др.* // Атомная энергия. 1956. Т. 3. С. 84.
18. *Курчатов И.В.* // Успехи физ. наук. 1956. Т. 59. Вып. 4. С. 603.
19. *Klimov A.I., Belov N.K., Tolkunov B.N.* // J. of Physics: Conference Series. 2020. V. 1698. P. 012034.
20. *Тимашев С.Ф.* // Журнал физ. химии. 2018. Т. 92. № 6. С. 883. https://doi.org/10.1134/S0036024418060183