



Лаборатория электродинамических исследований
предприятия «Протон-21»

**Результаты экспериментов
по инициированию
коллективных ядерных
реакций в сверхплотном
веществе**

Киев
2003

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	3
ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА	3
ПАРАМЕТРЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА.....	4
ОПТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ГЕНЕРИРУЕМОЕ В ЗОНЕ УДАРНОГО СЖАТИЯ.....	4
РЕГИСТРАЦИЯ БЫСТРЫХ ИОНОВ РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ ПЛАЗМЫ В ХОДЕ ВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ МИШЕНИ.....	7
РЕГИСТРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ ВСПЫШКИ С ПОМОЩЬЮ КАМЕРЫ- ОБСКУРЫ И МЕЛКОЯЧЕИСТОГО КОЛЛИМАТОРА	9
СРАВНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ЗОНЫ УДАРНОГО СЖАТИЯ МИШЕНЕЙ И АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В РЕНТГЕНОВСКОМ И ГАММА- ДИАПАЗОНАХ	11
АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	12
АНАЛИЗ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ ЭКСПЕРИМЕНТА	13
<i>Локальное исследование накопительных экранов методом МРСА.....</i>	<i>18</i>
<i>Интегральное исследование накопительных экранов методом МСТР</i>	<i>18</i>
АНАЛИЗ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ В ОСТАТОЧНОЙ АТМОСФЕРЕ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ	20
АНАЛИЗ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА МИШЕНИ, ОСАЖДЕННЫХ НА НАКОПИТЕЛЬНОМ ЭКРАНЕ.....	21
АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ГЛУБИНЕ В НАКОПИТЕЛЬНЫХ ЭКРАНАХ	22
НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ РАДИОАКТИВНОГО ИЗОТОПА КОБАЛЬТА (⁶⁰CO).....	23
НЕОРДИНАРНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ	24
ОБНАРУЖЕНИЕ НЕИДЕНТИФИЦИРУЕМЫХ МАСС АТОМАРНЫХ ИОНОВ С МАССОВЫМ ЧИСЛОМ >220 А.Е.М. В ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ НАКОПИТЕЛЬНЫХ ЭКРАНОВ МЕТОДОМ ВТОРИЧНОЙ ИОННОЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ	24
РЕГИСТРАЦИЯ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРАХ РАССЕЯННЫХ α -ЧАСТИЦ И ИОНОВ АЗОТА (¹⁴ N) ЦЕНТРОВ РАССЕЯНИЯ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ МАССОВЫМ ЧИСЛАМ > 200 А.Е.М.	24
ОБНАРУЖЕНИЕ НЕИДЕНТИФИЦИРУЕМЫХ ПИКОВ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО И ОЖЕ-ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ АНАЛИЗЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТИ НАКОПИТЕЛЬНЫХ ЭКРАНОВ	25
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБРАЗЦОВ В ВЕДУЩИХ ЗАРУБЕЖНЫХ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЦЕНТРАХ	26
Выдержки из официального заключения ПО «Луч» (Минатом России) об анализируемых объектах, предоставленных фирмой «ПРОТОН-21» для масс-спектрометрического анализа на приборе «FINNIGAN» MAT – 262	26
Выдержки из официального заключения MICRO PHOTONICS (SURFACE TEST), REPORT SIMS – 030623 FOR UNITED METALS LLC (USA) (В ПЕРЕВОДЕ)	26
РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ	27

Введение

В настоящей записке представлены некоторые результаты экспериментов по коллективным (синергетическим) ядерным преобразованиям в сверхплотном веществе. Эксперименты проведены в 1999 – 2003 г. в Лаборатории электродинамических исследований ООО «Протон-21» (Украина, г. Киев, руководитель проекта – к.т.н. С.В. Адаменко, генеральный директор – А.Г. Кохно) в целях разработки принципиально новой технологии утилизации радиоактивных отходов.

В основу работ была положена идея инициирования специальным электромагнитным воздействием самоусиливающегося кумулятивного процесса взрывного сжатия материала мишени до сверхплотностей, при которых, в результате полного ядерного перерождения в веществе возможно преобразование радиоактивных изотопов в стабильные.

Описание эксперимента

Для реализации идеи была создана экспериментальная установка, способная с помощью электронного пучка (первичный носитель концентрируемой энергии) передать твердотельной мишени (Рис. 1а, 13) до 1 кДж энергии за время импульса порядка 10^{-8} секунды, что позволяет достичь плотности мощности в области сжатия $\sim 10^{22}$ Вт \times см $^{-3}$. Эксперименты проводились в условиях вакуума – остаточное давление в вакуумной камере $\sim 10^{-3}$ Па.

Технология процесса и оптимальные параметры экспериментальной установки отрабатывались на нерадиоактивных (из-за сложности работы с радиоактивными) химически чистых материалах (медь (Cu с чистотой 99.99 масс. %), серебро (Ag 99.99 масс. %), тантал (Ta 99.68 масс. %), свинец (Pb 99.91 масс. %) и др.), из которых изготавливались мишени и специальные накопительные экраны (Рис. 1, 18).

Проведенные на установке эксперименты показали, что в результате взрывного сжатия мишень, в которую энергия поступает снаружи, разрушается взрывом изнутри (Рис. 1б, 14). Процесс сопровождается радиальным разлетом вещества мишени, с осаждением его на накопительном экране. Осажденное вещество имеет форму нерегулярно рассеянных капель, шариков, пленок и т.д. (Рис. 1, 18).

Воздействие электронного пучка (когерентного драйвера)

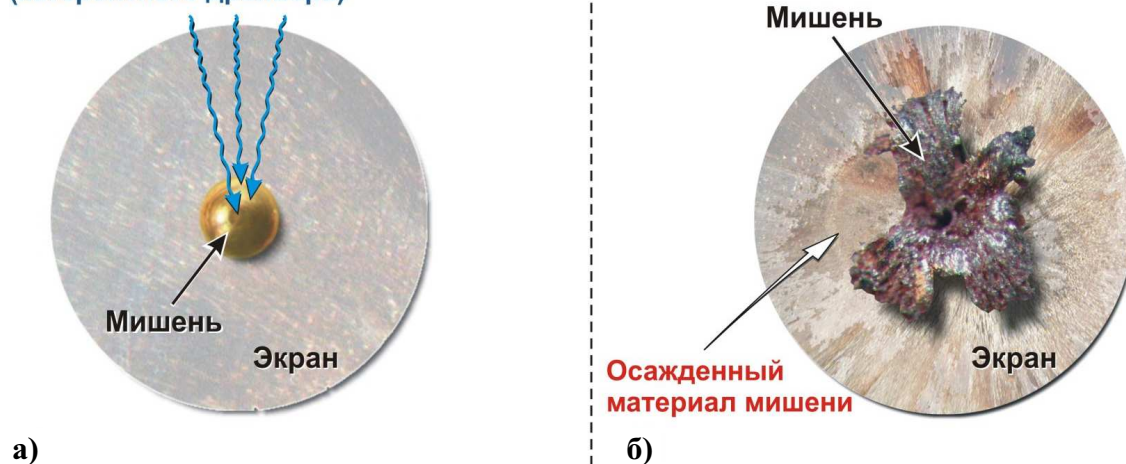


Рис 1. Схема эксперимента по сжатию материала мишени, демонстрирующая начальное состояние образца (а), и его состояние после эксперимента (б).

Параметры динамического процесса

Оптическое излучение, генерируемое в зоне ударного сжатия

Регистрация оптического излучения плазменного сгустка в окрестности зоны ударного сжатия проводилась спектрометром SL 40-2-3648 USB. Прибор представляет собой двухканальную систему регистрации оптических спектров на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС). Диспергирующим элементом в каждом из каналов спектрометра служит дифракционная решетка с параметрами: количеством штрихов на 1 мм – 600, обратной линейной дисперсией, соответственно, 35.09 нм/мм и 31.95 нм/мм, разрешением по длинам волн – <1.5 нм и размерами 12×10 мм.

Регистрация осуществлялась в азимутальной плоскости установки через выходное окно вакуумной камеры из органического стекла толщиной 4 мм. Приемник светового сигнала (оптокабель) располагался на расстоянии ~ 6 м от зоны ударного сжатия и сдвоенным оптоволоконным кабелем длиной 2 м соединялся со спектрометром и быстродействующим фотоэлектронным умножителем ФЭУ-30. Сигнал с ФЭУ регистрировался цифровым осциллографом. Таким образом, параллельно с регистрацией спектра оптического излучения проводилась регистрация временного сигнала от световой вспышки.

Калибровка спектрометра проводилась:

- в ближнем ультрафиолете – по непрерывному спектру дейтериевой лампы ДДС-80 с паспортным значением величины энергетической силы света в спектральном интервале 215 – 300 нм ~ 1.8 мВт/стер;
- в диапазоне видимого света – по непрерывному спектру вольфрамовой лампы накаливания мощностью 100 Вт.

Качество калибровки по диапазону оптического излучения проверено на отдельных линиях меди с известной интенсивностью.

На Рис. 2 приведен типичный спектр оптического излучения плазменного сгустка в зоне ударного сжатия мишени.

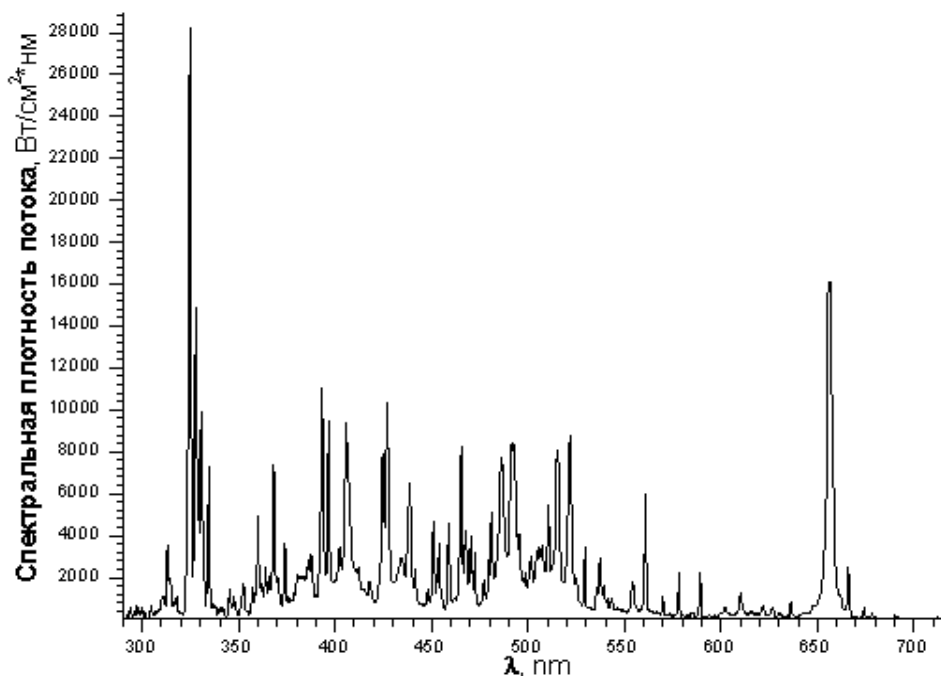


Рис. 2. Спектр оптического излучения плазменного сгустка в эксперименте №3981.

Обработка спектра оптического излучения проводилась с использованием стандартной компьютерной программы Peak Fit, позволяющей работать с линейчатыми спектрами, включающими до сотни спектральных линий.

Оценка параметров плазменного сгустка в эксперименте №3981

1) Ионная компонента (Табл. 1)

- a) Средняя энергия и скорость иона – 9.48 кэВ и 1.6×10^7 см \times с $^{-1}$, соответственно – рассчитаны по формулам для доплеровского уширения.
- b) Количество излучающих атомов – 8.03×10^{17} , рассчитано исходя из графиков роста интегрального поглощения спектральных линий («кривых роста»). Для отдельных спектральных линий использовалась нормировка интенсивности на эффективную площадь поперечного сечения плазменного сгустка и время излучения.
- c) Энергия ионной составляющей ~ 750.89 Дж, получена на основе анализа гауссовских компонент спектральных линий отдельных ионов различных химических элементов.

2) Электронная компонента

- a) Температура электронов – $T_e \cong 0.36$ кэВ, оценена по амплитудам водородных линий.
- b) Плотность электронов $\sim 1.2 \times 10^{17}$ см $^{-3}$ (в ударном приближении), получена из анализа лоренцевских составляющих спектральных линий в предположении, что уширение линий обусловлено столкновениями ионов с электронами.
- c) Оценка полного количества электронов в объеме плазменного сгустка – $N_e \approx 1 \times 10^{18}$.
- d) Энергия электронной составляющей ~ 60 Дж.

Эффективный размер плазменного сгустка – 3 см (диаметр) был получен, исходя из эффективного времени излучения и средней скорости ионов. Эффективное время излучения было принято равным длительности фронта сигнала световой вспышки, регистрируемого ФЭУ $\sim 50 - 200$ нс (в рассматриваемом эксперименте $\tau = 60$ нс).

Следует обратить внимание на присутствие в спектре плазменного сгустка спектральных линий ионов Fe, Ni и др. химических элементов (см. Табл. 1), не входящих в исходный состав материала мишени, однако по энергии и количеству излучающих атомов конкурирующих с его основными компонентами (Pb, Cu).

Сравнение параметров излучения в эксперименте №3981 с экспериментом №5980, который был выполнен в режиме имитации* иницирующего воздействия на мишень, показало значительные отличия энергии корпускулярной компоненты плазмы, несмотря на внешнее сходство оптических спектров и близкие величины светового выхода (14 Дж и 9 Дж, соответственно).

Полный выход корпускулярной энергии в эксперименте (№3981) составляет ~ 808 Дж, и на два порядка превышает аналогичный выход ~ 12 Дж в эксперименте выполненного в режиме имитации (№5980).

* Режим имитации имеет те же энергетические параметры исходного электромагнитного воздействия, но не создает условий для запуска кумулятивного процесса самоконцентрации энергии в мишени.

Таблица 1. Оценки энергетического выхода ионной компоненты плазменного сгустка в окрестности зоны ударного сжатия с учетом стадий ионизации (Эксперимент №3981, мишень – Pb, Cu)

Химический элемент	Средняя энергия иона, кэВ	Средняя скорость иона, см·с ⁻¹	Кол-во излучающих атомов	Энергия ионов, Дж
H	1.6E-01 ±3.8E-02	1.7E+07 ±2.2E+06	1.72E+17	5.46
C	1.5E+00 ±2.2E-01	1.5E+07 ±1.1E+06	3.21E+16	8.90
F	1.2E+00 ±5.9E-02	1.1E+07 ±2.8E+05	2.04E+17	14.40
Al	3.9E+00 ±5.1E-01	1.5E+07 ±1.1E+06	4.19E+15	2.69
Cl	5.7E+00 ±6.3E-01	1.7E+07 ±7.5E+05	6.72E+15	6.60
Ca	6.1E+00 ±9.2E-01	1.7E+07 ±1.3E+06	6.61E+15	4.96
Ti	9.4E+00 ±5.0E-01	1.9E+07 ±4.0E+05	2.00E+16	31.00
Cr	8.9E+00 ±1.6E+00	1.8E+07 ±1.6E+06	5.14E+15	6.73
Fe	7.7E+00 ±5.1E-01	1.6E+07 ±5.3E+05	1.33E+17	139.00
Ni	9.1E+00 ±9.5E-01	1.6E+07 ±9.9E+05	7.53E+16	127.00
Cu	9.0E+00 ±1.0E+00	1.6E+07 ±9.1E+05	7.52E+16	138.00
Zn	1.1E+01 ±1.3E+00	1.8E+07 ±1.2E+06	1.98E+16	41.50
Mo	1.4E+01 ±1.2E+00	1.6E+07 ±7.5E+05	1.04E+16	22.80
Xe	1.8E+01 ±5.5E+00	1.6E+07 ±2.2E+06	1.78E+15	6.28
Ba	1.7E+01 ±6.9E+00	1.5E+07 ±2.8E+06	2.15E+15	8.57
Pb	2.9E+01 ±3.4E+00	1.6E+07 ±9.4E+05	3.51E+16	187.00
ИТОГ:			8.03E+17	750.89

Таблица 2. Оценки энергетического выхода ионной компоненты плазменного сгустка с учетом стадий ионизации (Эксперимент №5980, режим имитации)

Химический элемент	Средняя Энергия иона, кэВ	Средняя скорость иона, см·с ⁻¹	Кол-во излучающих атомов	Энергия ионов, Дж
H	5.2E-03 ±8.5E-04	3.1E+06 ±2.7E+05	1.78E+16	0.02
C	6.5E-02 ±6.2E-03	3.2E+06 ±1.5E+05	7.83E+15	0.08
O	1.0E-01 ±4.5E-03	3.5E+06 ±7.8E+04	1.55E+16	0.24
Cl	2.4E-01 ±1.2E-02	3.6E+06 ±8.9E+04	2.82E+15	0.10
Ca	2.9E-01 ±5.2E-02	3.5E+06 ±1.8E+05	1.35E+15	0.06
Ti	3.4E-01 ±2.9E-02	3.7E+06 ±1.6E+05	2.82E+15	0.14
Cr	3.9E-01 ±4.0E-02	3.8E+06 ±1.9E+05	1.23E+15	0.09
Fe	3.9E-01 ±2.6E-02	3.6E+06 ±1.2E+05	3.17E+15	0.17
Ni	4.8E-01 ±4.6E-02	4.0E+06 ±1.9E+05	1.94E+15	0.13
Cu	4.6E-01 ±2.0E-02	3.7E+06 ±8.3E+04	9.44E+16	5.88
Zn	4.1E-01 ±3.8E-02	3.5E+06 ±1.6E+05	4.58E+15	0.32
Mo	7.3E-01 ±1.1E-01	3.8E+06 ±2.8E+05	2.96E+15	0.31
Pb	1.1E+00 ±1.7E-01	3.2E+06 ±2.5E+05	1.62E+15	0.31
ИТОГ:			1.58E+17	7.83

Регистрация быстрых ионов расширяющейся плазмы в ходе взрывного разрушения мишени

Для регистрации быстрых ионов используются трековые детекторы CR-39, позволяющие видеть накопительный эффект воздействия ионных потоков на приемники ионов в различных конфигурациях ионно-оптических устройств; применяются также магнитные анализаторы, дающие возможность анализировать осциллограммы электрических сигналов ионов и провести времяпролетные измерения в каждом из выстрелов.

Трековые детекторы, подставленные прямо под облучение плазменным фронтом на расстоянии 3–13 см от центра зоны ударного сжатия, демонстрируют сплошное заполнение «плазменными треками» (Рис. 3).

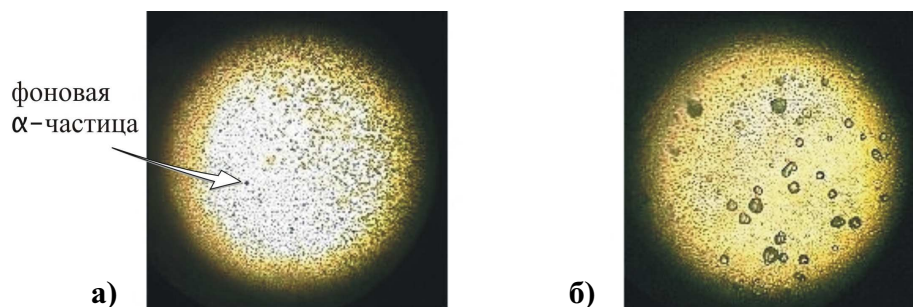


Рис. 3. Картина заполнения трекового детектора, содержащая мелкие (плазменные) и выделяющиеся крупные треки струй ионов (а); треки особо крупных плазменных частиц (б).

По наблюдениям треков нижняя оценка количества трекообразующих ионов с энергией 10–100 кэВ/нуклон составляет $10^{10} - 10^{12}$.

В ряде экспериментов наблюдалось – помимо сплошного высыпания плазменных треков – повышенное количество ядерных треков, по скорости трекового травления близких или тождественных α -частицам (Рис. 4).

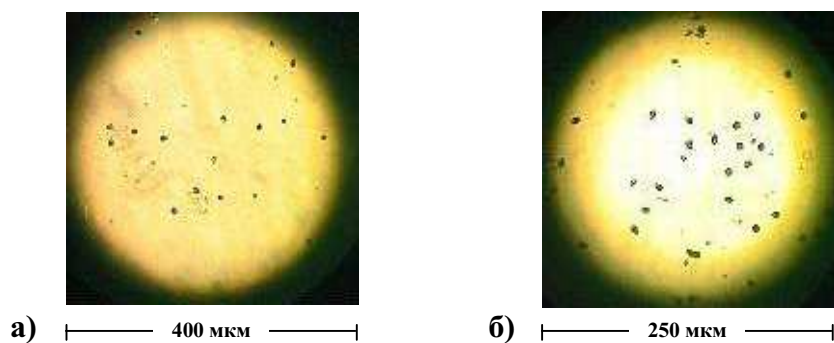


Рис. 4. Картина заполнения детектора треками α -частиц после экспозиции в экспериментах № 5092, 5095, 5096 (а); после 30 секундной экспозиции детектора над источником Pu^{239} с интенсивностью 10^4 импульсов / мин (б).

К редким событиям относятся факты обнаружения коллективных, централизованных треков, которые нельзя отнести к независимым α -частицам. Таким примером является обнаружение на детекторе расположенном сразу за экранирующей сеткой уникального централизованного трекового кластера состоящего из 276 треков (Рис. 5).

Обращает на себя внимание тот факт, что указанные треки обладают сильно выраженной общей направленностью, на Рис. 5 она ориентирована преимущественно вниз. Последнее означает, что все указанные частицы принадлежат одному семейству и вылетели они из одного общего центра с мало отличающимися по модулю и направлению импульсами.

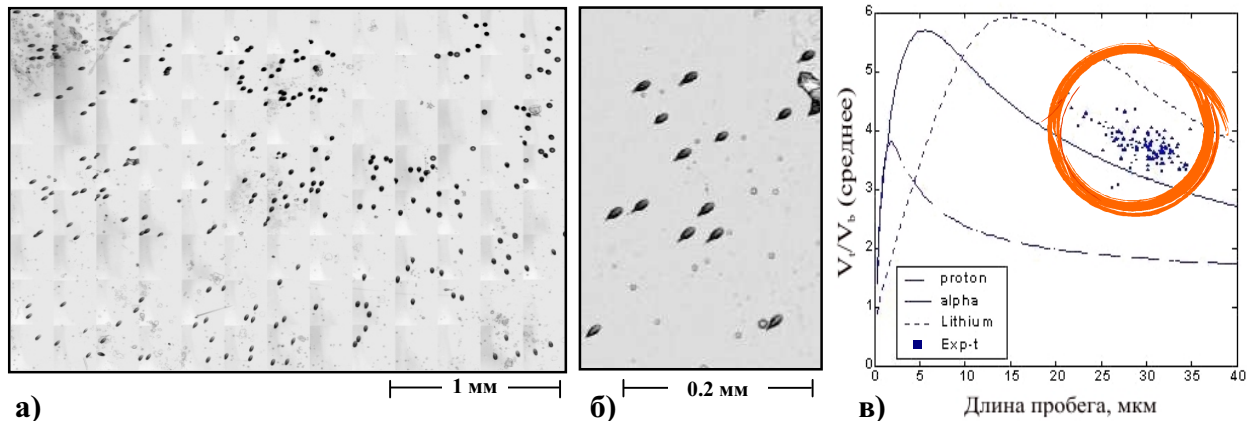


Рис 5. Картина заполнения детектора треками в эксперименте №4109, содержащая «гигантский» трековый кластер из 276 треков (а); ее отдельный фрагмент размером 240×300 мкм (б); сопоставление отношения измеренных величин скорости трекового и объемного травления с длиной пробега (в).

Анализ треков, выполненный по алгоритму, использующему результаты оптических измерений наклонных треков на сканирующем оптическом микроскопе Olympus, приводит к выводу о том, что кластер состоял из α -частиц с энергиями в диапазоне 4 – 6 МэВ.

При регистрации радиальных составляющих ионного потока магнитным анализатором, расположенным непосредственно в разрядной камере, наибольший интерес представляют измерения электрического сигнала прямопролетного коллектора, регистрирующего самые быстрые частицы (Рис. 6).

Измерения электрических сигналов показывают, что наиболее быстрые ионы, определяющие ток ионов в радиальном направлении, несут энергию порядка десятков кэВ/нуклон. Определение полного количества быстрых частиц из токовых измерений затруднено влиянием электромагнитных наводок на переднем фронте раннего коллекторного сигнала, однако, пересчет тока пучков этих ионов «на 4 π » дает на много порядков более высокую оценку по сравнению с числом 10^{12} частиц, получаемым из трековых данных.

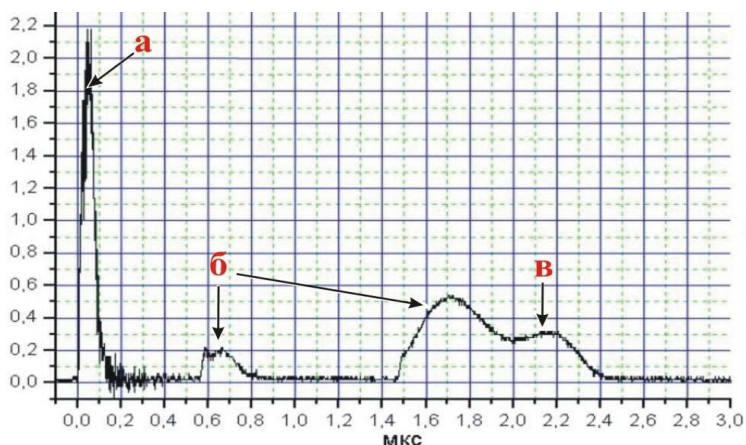


Рис. 6. Осциллограмма, характеризующая поток частиц расширяющейся плазмы. Маркером (а) отмечены легкие малозарядные или тяжелые многозарядные одноатомные ионы, энергия самых быстрых из них оценивается как 20 кэВ/нуклон, что подтверждается наличием плазменных треков на трековом детекторе в позиции «прямо напролет» и слабо отклоненных траекторий; маркером (б) — тяжелые однозарядные атомные ионы, в том числе сверхтяжелые, либо малозарядные кластеры; маркером (в) — сверхтяжелые атомные ионы либо кластеры.

Регистрация изображения плазменной вспышки с помощью камеры-обскуры и мелкоячеистого коллиматора

Изображение плазменной вспышки в зоне ударного сжатия мишени представлено, как правило, размытыми, растянутыми до нескольких миллиметров объектами, состоящими из однотипных плазменных треков. По данным калибровки детекторов ионами, полученным на ускорителях ядерных частиц, наиболее контрастные изображения треков формируется под воздействием ионов с энергиями $\sim 100 \dots 400$ кэВ/нуклон. Зарегистрированы также треки потоков ускоренных протонов и дейтронов с энергией до 1.6 МэВ.

Пример изображения заполнения детектора треками, полученного прямым проецированием на детектор в камере-обскуре с малой диафрагмой (Рис. 7а), приведен на Рис. 7б. На Рис. 8 представлены увеличенные фрагменты изображения заполнения детектора, содержащие треки протонов и дейтронов с энергией 1 МэВ.

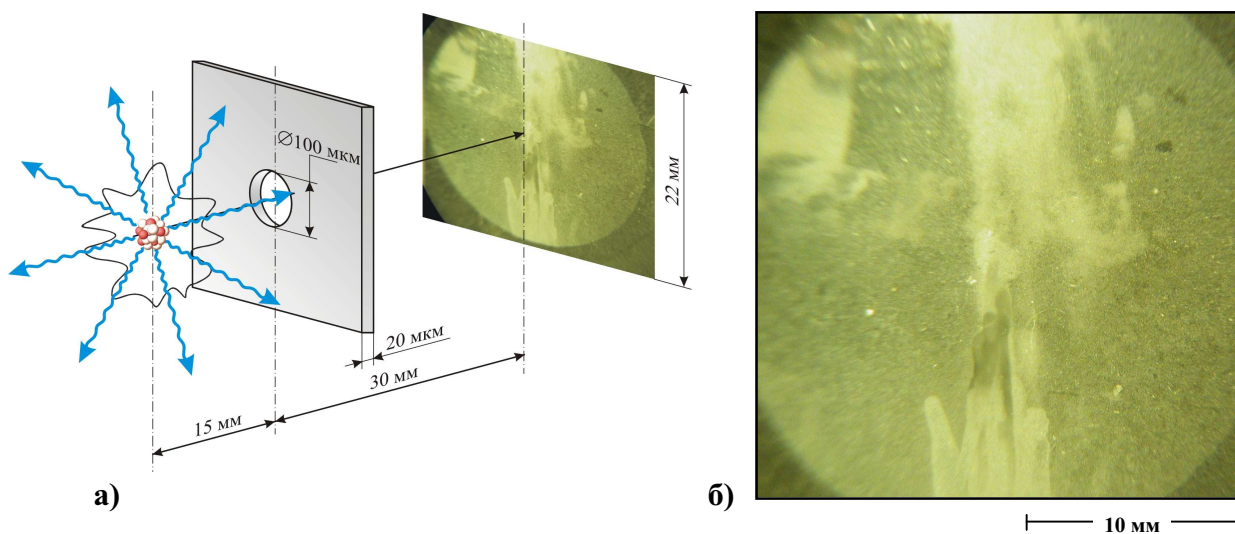


Рис. 7. Геометрическая схема съемки камерой-обскурой плазменной вспышки зоны ударного сжатия мишени (а); изображение заполнения детектора треками в эксперименте № 5872 (б).

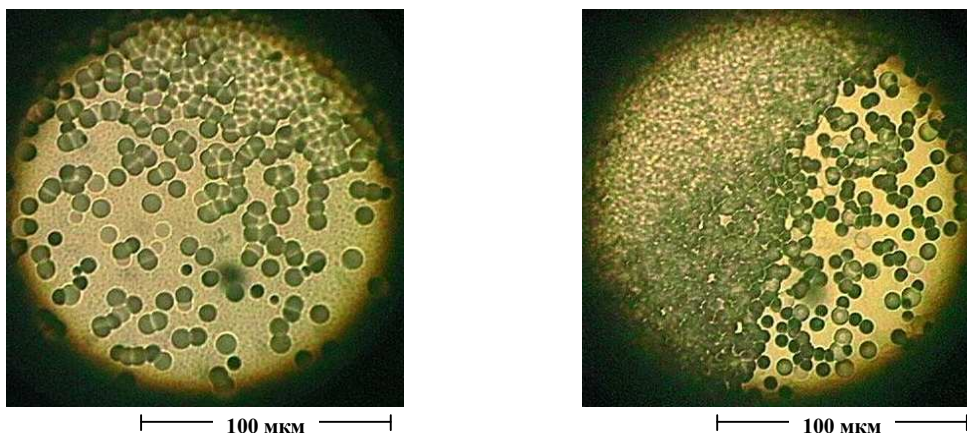


Рис. 8. Фрагменты изображения заполнения детектора треками протонов и дейтронов с энергией 1 МэВ в эксперименте № 5872.

Сравнение экспериментально полученных с помощью мелкоячеистого коллиматора (Рис. 9) изображений квазиточечного источника (Рис. 10), с изображениями компьютерной модели прохождения гамма-квантов сквозь мелкоячеистый коллиматор (Рис. 11), позволяет сделать следующие выводы:

1. размеры источника – порядка 200 мкм;
2. источник может иметь вытянутую форму с размерами в направлении вытягивания до 500 мкм, при этом предполагаемые поперечные размеры остаются прежними;
3. в случае вытянутого источника может наблюдаться существенная (на порядок и более) неоднородность интенсивности излучения по длине источника;
4. максимум спектра гамма-квантов находится в районе 30 – 40 кэВ;
5. количество гамма-квантов, сферически разлетающихся (4π) из центра квазиточечного источника за время 10^{-8} секунды, порядка 10^{15} штук.

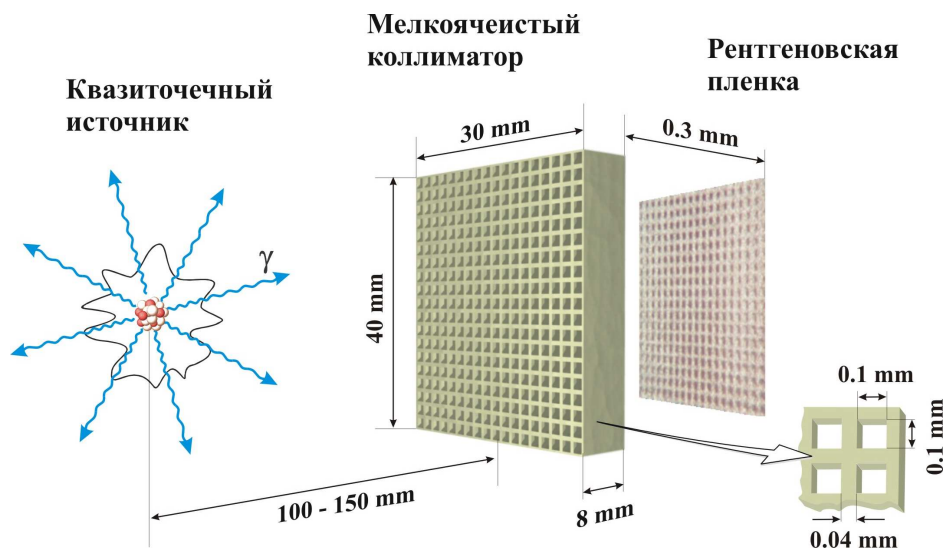


Рис. 9. Схема размещения мелкоячеистого коллиматора относительно квазиточечного источника.

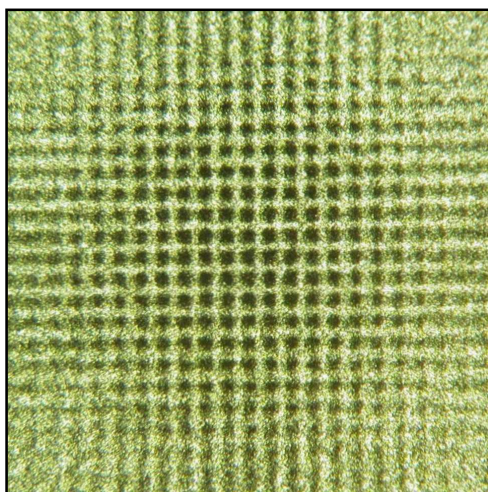


Рис. 10. Изображение квазиточечного источника на рентгеновской пленке, полученное с помощью мелкоячеистого коллиматора.

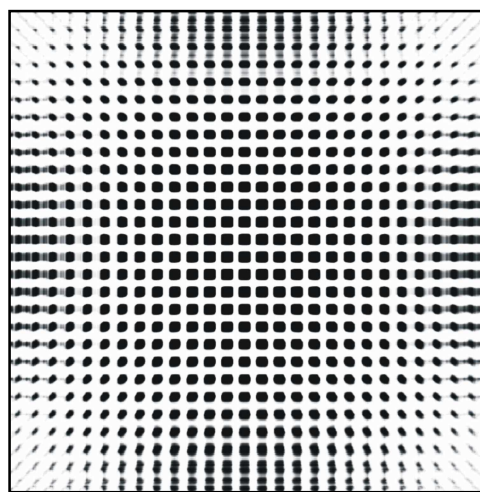


Рис. 11. Компьютерное моделирование прохождения гамма-квантов сквозь мелкоячеистый коллиматор.

Сравнение спектрального состава излучения от зоны ударного сжатия мишеней и астрофизических объектов в рентгеновском и гамма-диапазонах

На Рис. 12 приведены распределения спектральной плотности излучения в рентгеновском и гамма-диапазонах таких астрофизических объектов, как Солнце, пульсар из Крабовидной туманности, квазар 3С 273, сверхновая 1987г (SN1987A) и кратковременные всплески гамма-излучения. Указанные распределения представлены в логарифмическом масштабе с коэффициентом растяжения вдоль оси ординат, подобранным так, чтобы каждое из них было удобно сравнивать с распределением для квазиточечного источника. Распределение спектральной плотности излучения для квазиточечного источника является результатом усреднения по ~ 2500 измерениям. В качестве меры сравнения рассматриваемых распределений использовались коэффициенты корреляции (Табл. 3).

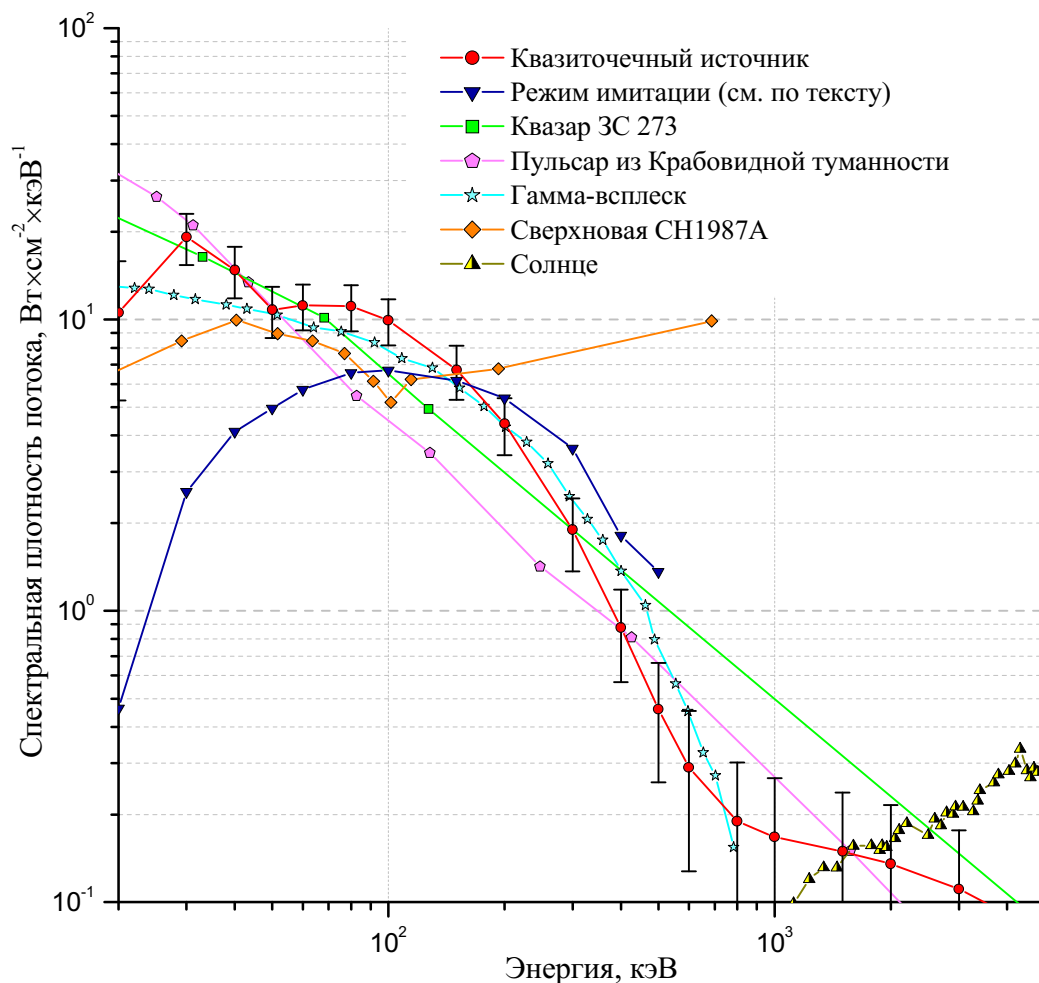


Рис. 12. Распределения спектральной плотности излучения квазиточечного источника и астрофизических объектов. Масштаб — логарифмический, коэффициентом растяжения вдоль оси ординат для квазара 3С 273, пульсара из Крабовидной туманности, гамма-всплеска, сверхновой SN1987A и Солнца составляют 3×10^{19} , 3×10^{18} , 2×10^{17} , 2×10^{19} и 1×10^3 , соответственно.

Распределения спектральной плотности излучения квазиточечного источника в отдельных измерениях получены методом решения обратной задачи из фильтрационных кривых, зарегистрированных детекторами GaAs с набором фильтров из медной фольги толщиной от 20 мкм до 11 мм. Регистрация токовых сигналов детекторов осуществлялась быстродействующими осциллографами «Tektronix» без предварительного усиления в азимутальной плоскости на расстоянии 23 см от центра зоны ударного сжатия через алюминиевую фольгу толщиной 350 мкм.

Таблица 3. Сравнение распределения спектральной плотности излучения квазиточечного источника с указанными распределениями астрофизических объектов

Объект	Энергетический диапазон, кэВ	Коэффициент корреляции
Квazar 3C 273	10-4000	0.94
Пульсар из Крабовидной туманности	10-4000	0.92
Гамма-всплеск	20-800	0.99
Сверхновая SN1987A	10-700	-0.23
Солнце	200-5000	-0.96
Режим имитации*	20-500	0.24

Результаты сравнения спектров показали, что параметры излучения квазиточечного источника в диапазоне энергий от 10 кэВ до 3 – 5 МэВ очень близки к параметрам излучения нестационарных астрофизических объектов (квazar, пульсар, гамма-всплески, см. Табл. 3), отличающихся компактностью излучающей области (даже по космическим масштабам) и наличием значительных магнитных полей. Обращает на себя внимание факт совпадения функциональных соотношений, описывающих непрерывные спектры гамма-всплесков (спектральная плотность

потока фотонов $\frac{dN}{dE} \sim E^{-\alpha} \cdot \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right)$ с $\alpha = 0.5 \div 1.5$ и характеристической энергией

E_0 , рассматриваемой в качестве меры температуры излучения и меняющейся со временем в значительных пределах: от 100 до 1000 кэВ) и используемых при восстановлении из экспериментальных данных спектров квазиточечного источника ($\alpha = 1$ и E_0 с максимальным значением до нескольких тысяч кэВ). Различие в спектрах квазиточечного источника и SN1987A наблюдается в основном в высокоэнергетической части, где в спектре квазиточечного источника имеет место значительный дефицит фотонов.

Спектральный состав излучения квазиточечного источника (тормозное излучение) отличается от состава излучения в эксперименте выполненного в режиме имитации* повышенным выходом фотонов в низкоэнергетической части, а также наличием выхода фотонов в высокоэнергетической части спектра.

Аналитические исследования

Одна из задач проведенной серии исследований состояла в получении ответа на вопрос: происходят ли ядерные превращения материала мишени в процессе ударного сжатия. Для этого, в частности, было выполнено:

1. Сопоставление элементного состава исходного материала мишени и накопительного экрана до эксперимента с элементным составом образовавшегося конденсата, с целью:
 - а) обнаружения в составе конденсата химических элементов, отсутствовавших в исходных материалах;
 - б) определения степени возрастания в исследуемых пробах концентраций примесных химических элементов, входивших в состав исходных материалов.
2. Измерение изотопного состава химических элементов конденсата и газов (в объеме рабочей камеры).
3. Измерение уровня радиоактивности мишеней содержащих атомы нестабильных изотопов, рассредоточенных в объеме мишени (метод «меченых атомов»), до и после эксперимента.

* Режим имитации имеет те же энергетические параметры исходного электромагнитного воздействия, но не создает условий для запуска кумулятивного процесса самоконцентрации энергии в мишени.

Анализ элементного состава образцов после эксперимента

Аналитические исследования образцов проводились с использованием современных методик и оборудования (Табл. 4).

Таблица 4. Аналитические методы и оборудование, используемые при исследованиях элементного и изотопного составов поверхностных и приповерхностных слоев мишеней и накопительных экранов

Метод	Прибор (произв., страна)
Микрорентгеноспектральный анализ	SX50 (CAMECA, France)
	РЭММА102 (Selmi, Украина)
	BS340 (TESLA, Чешская Республика)
	Superprobe 733 (JEOL, Japan)
Рентгенофлуоресцентный анализ	Установка РФА (КНУ, Украина)
Оже-электронная спектроскопия	JAMP-10S (JEOL, Japan)
Масс-спектрометрия тлеющего разряда	VG-9000 (VG Elemental, UK)
Масс-спектрометрия вторичных пост – ионизированных нейтральных частиц	INA-3 (Leybold, Germany)
Вторичная ионная масс–спектрометрия	IMS-4f (CAMECA, France)
Термоионизационная масс-спектрометрия	Finnigan MAT-262 (ThermoFinnigan, Germany)
Лазерная масс-спектрометрия	Лазерный масс-спектрометр (КНУ, Украина)
Обратное Резерфордское рассеяние	Циклотронный ускоритель ионов U-120 (НИИ ЭФА им. Ефремова, Россия), электростатический ускоритель EGP-10T «ТАНДЕМ» (ИЯИ НАН Украины)

За период с 1999 до 2004 года произведено более 6000 ударных динамических сжатий твердотельных мишеней, завершившихся их специфическим взрывным разрушением и радиальным разлетом трансформированного вещества мишени, а также выполнено и задокументировано более 15000 различных аналитических исследований по ~ 800 образцам (Табл. 5). При использовании локальных методов количество анализируемых точек на каждом образце составляло около 20 шт.

Таблица 5. Перечень аналитических методов и суммарное количество анализов

Метод	Образцы	Анализы
Микрорентгеноспектральный анализ	698	12009
Оже-электронная спектроскопия	105	1607
Масс-спектрометрия	167	1631
Обратное Резерфордское рассеяние	51	51
ИТОГ:		15298

На Рис. 14 – 17, 19 представлены типичные результаты взрывного разрушения мишени. В окнах-вставках приведены концентрации (в массовых процентах) химических элементов в указанных на фотографиях исследуемых точках (зонах) поверхностей мишеней и накопительных экранов. Желтым маркером отмечены химические элементы, отсутствующие в составе исходных образцов.

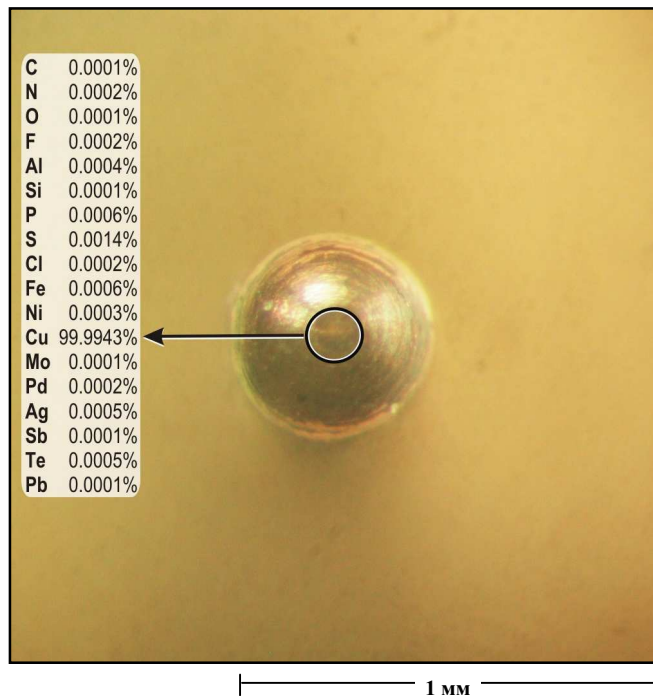


Рис 13. Мишень до эксперимента.

Материал мишени — медь (Cu 99.99 масс. %).

Метод исследования — масс-спектрометрия тлеющего разряда (VG-9000, диапазон анализируемых масс — до 250).

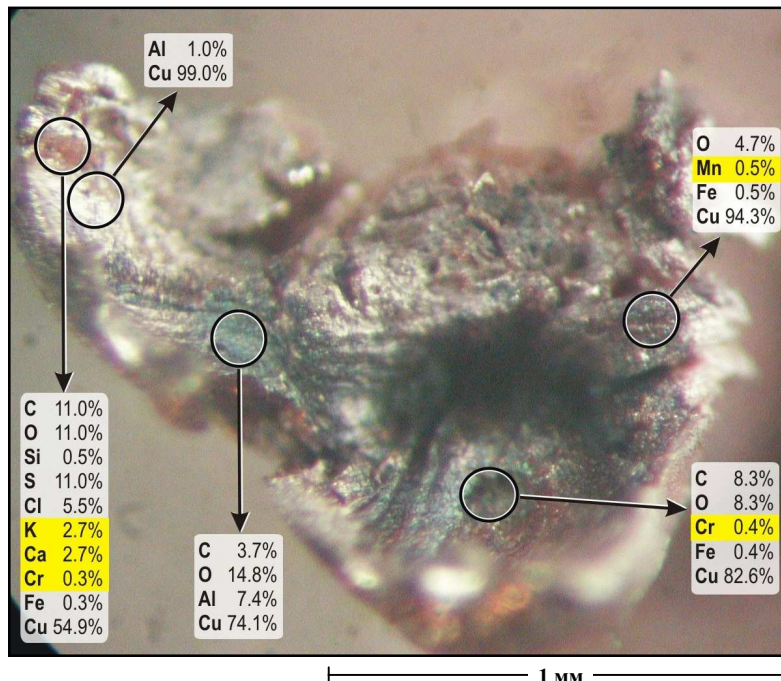


Рис 14. Мишень после эксперимента №1684.

Материал мишени — медь (Cu 99.99 масс. %).

Метод исследования — микрорентгеноспектральный анализ (РЭММА102, диапазон определяемых элементов — все, начиная с В).

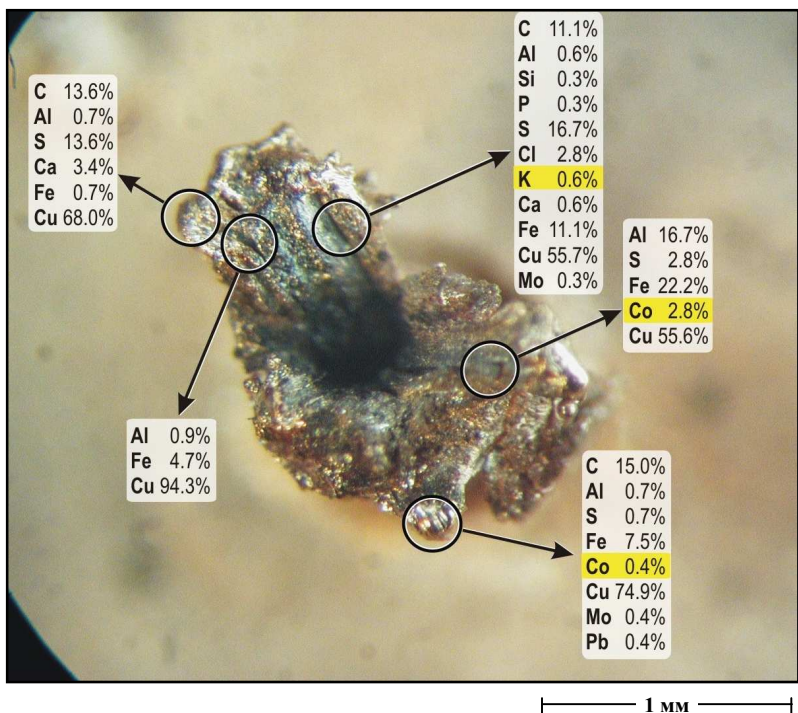


Рис 15. Мишень после эксперимента №1685.
 Материал мишени — медь (Cu 99.99 масс. %).
 Метод исследования — микрорентгеноспектральный анализ (РЭММА102, диапазон определяемых элементов — все, начиная с В).

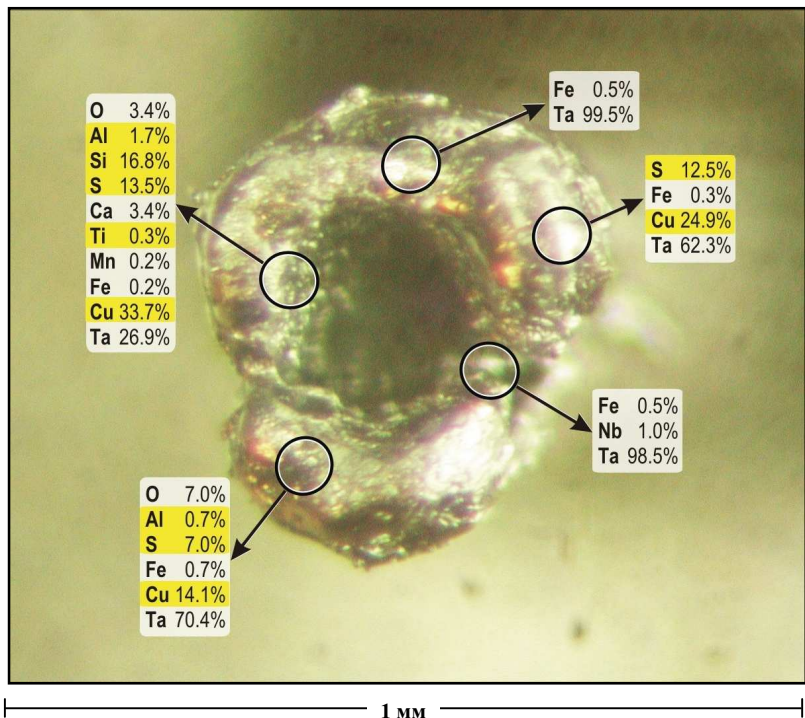


Рис. 16. Мишень после эксперимента №1754.
 Материал мишени — тантал (Ta 99.68 масс. %).
 Метод исследования — микрорентгеноспектральный анализ (РЭММА102, диапазон определяемых элементов — все, начиная с В).

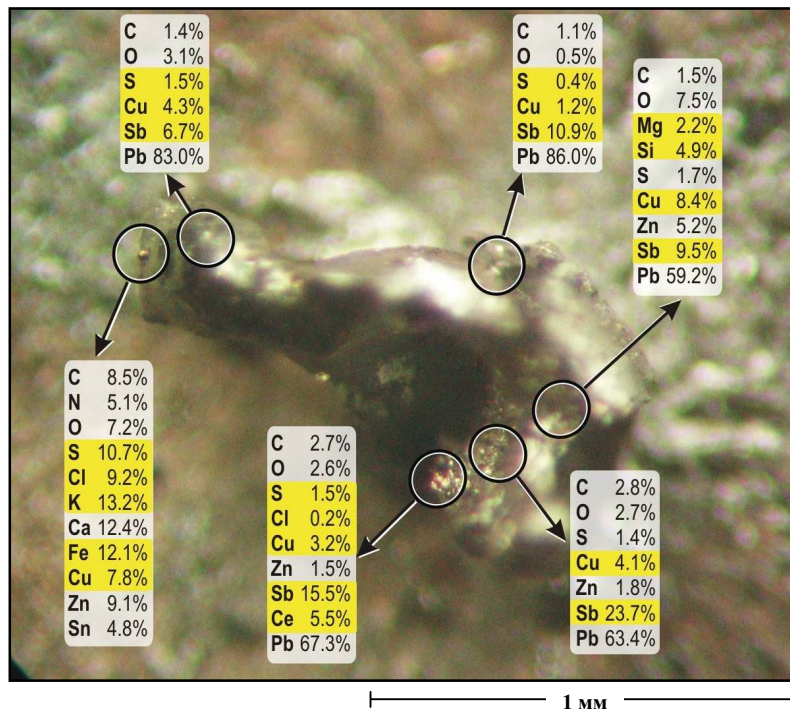


Рис. 17. Мишень после эксперимента №2275.
 Материал мишени — свинец (Pb 99.91 масс. %).
 Метод исследования — оже-электронная спектроскопия (JAMP-10S, диапазон определяемых элементов — все, кроме H и He).

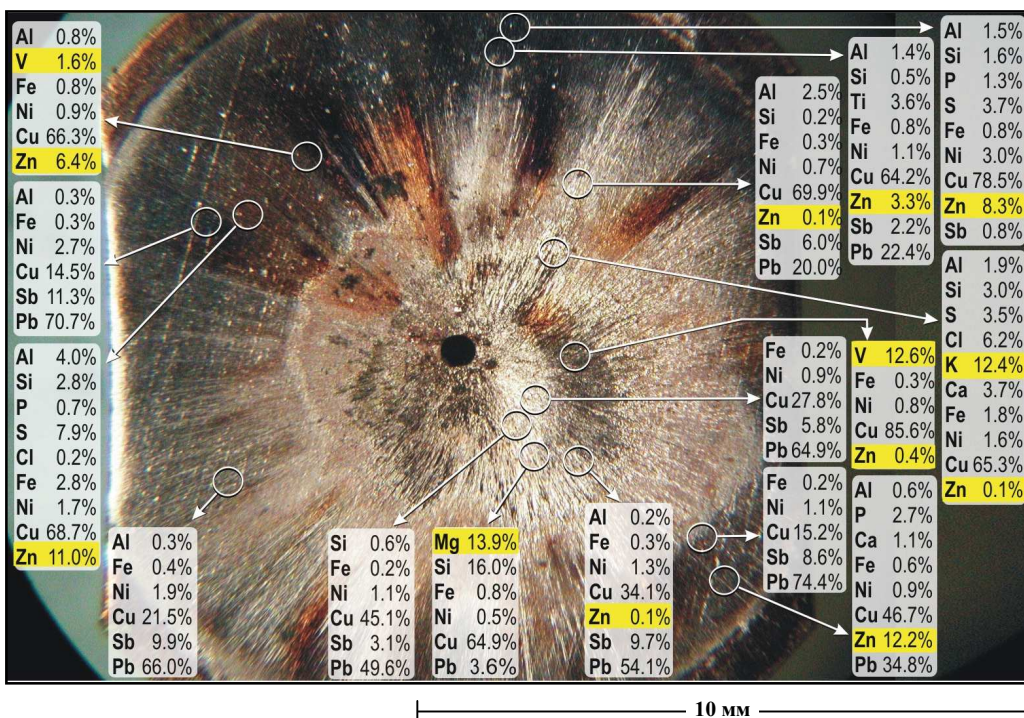


Рис. 18. Накопительный экран после эксперимента №3082.
 Материал мишени и накопительного экрана — медь (Cu 99.99 масс. %).
 Метод исследования — микрорентгеноспектральный анализ (РЭММА102, диапазон определяемых элементов — все, начиная с Na).

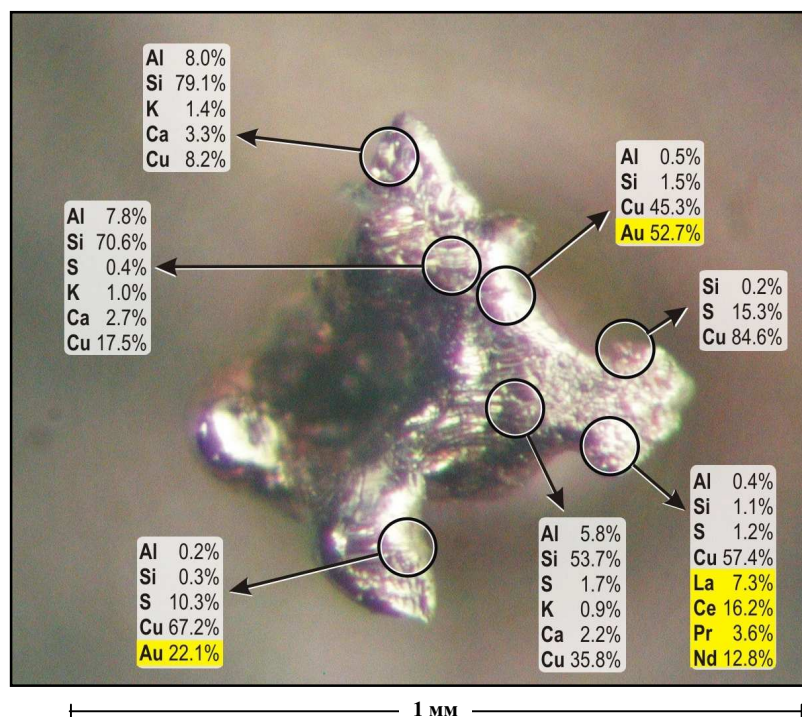


Рис. 19. Мишень после эксперимента №2107.
Материал мишени и накопительного экрана — медь (Cu 99.99 масс. %).
Метод исследования — микрорентгеноспектральный анализ (РЭММА102, диапазон определяемых элементов — все, начиная с Na).

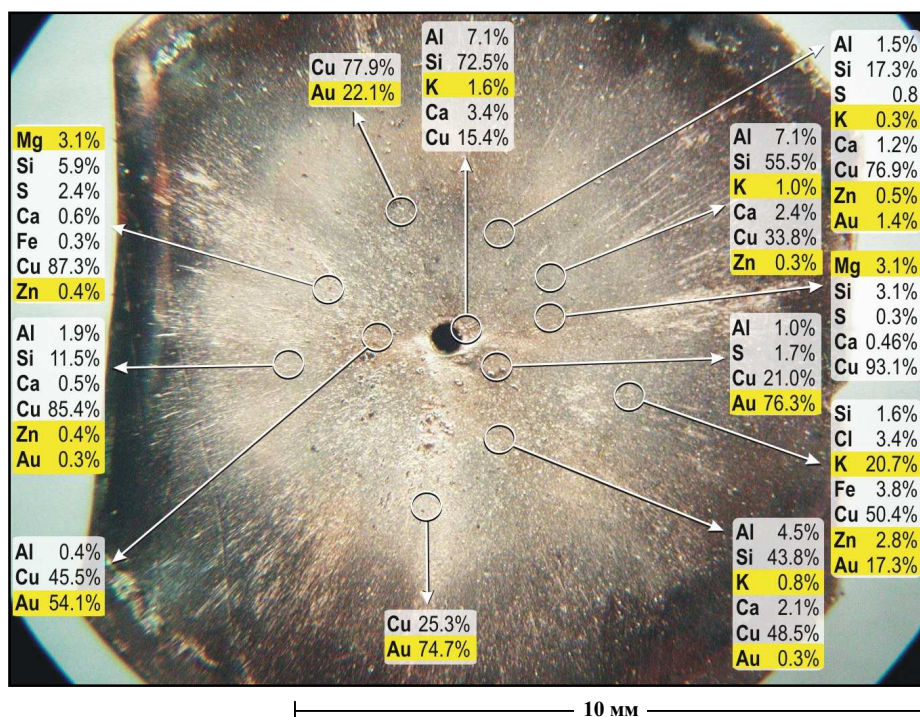


Рис. 20. Накопительный экран после эксперимента №2107.
Материал мишени и накопительного экрана — медь (Cu 99.99 масс. %).
Метод исследования — микрорентгеноспектральный анализ (РЭММА102, диапазон определяемых элементов — все, начиная с Na).

Дать оценку количества перерожденных атомов, осажденных на экране в результате взрыва мишени, позволило сопоставление состава исходного материала мишени и накопительного экрана с данными исследований образцов после эксперимента методами локального микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) и интегрального исследования масс-спектрометрии тлеющего разряда (МСТР).

Локальное исследование накопительных экранов методом МРСА

Исследование методом МРСА проводилось с помощью микрорентгоспектрального анализатора РЭММА-102 (SELMI, г. Сумы, Украина) с ускоряющим напряжением электронного пучка 35 кэВ, рабочим током зонда 0.1 нА. Исследовался медный накопительный экран (Cu 99.99 масс. %) после эксперимента №5094 с медной мишенью (Cu 99.99 масс. %). Анализ проводился согласно схеме изображенной на Рис. 21.

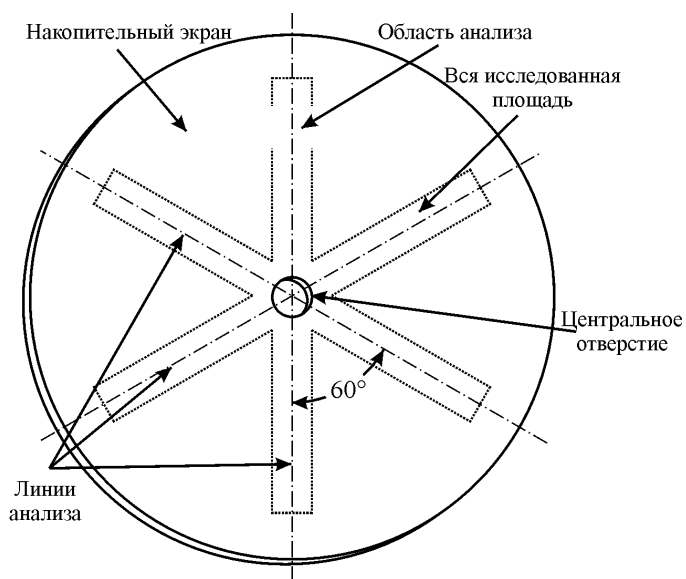


Рис. 21. Схема исследования методом МРСА.

Среднее количество примесных атомов, содержащихся в поверхностном слое матрицы всего накопительного экрана, было оценено на выборке из 113 его участков фиксированной площади. А также по выборке из 417 частиц, находящихся на поверхности накопительного экрана, оценено среднее количество примесных атомов, содержащееся в одной частице, которое затем было пересчитано в количество примесных атомов, содержащееся во всех таких частицах на поверхности всего накопительного экрана.

В результате обработки данных локальных исследований методом МРСА было рассчитано общее количество атомов примесных атомов, осажденных на экране в результате взрыва мишени в эксперименте №5094 – 1.2×10^{18} .

Основным недостатком использованной методики является то, что полученная оценка не есть результат прямого измерения. А использованная процедура анализа не исключает той возможности, что примесные атомы на поверхности накопительного экрана могли появиться вследствие перераспределения примесей из его объема.

Интегральное исследование накопительных экранов методом МСТР

Интегральное исследование методом МСТР проводилось с помощью масс-спектрометра тлеющего разряда VG 9000 (VG Elemental, UK) с диапазоном регистрируемых масс 1...250 а.е.м., разрешением по массам ($M/\Delta M$) 7000...9000.

Задачей исследования была регистрация состава всего накопительного экрана до и после взрыва мишени. При этом количество примесных атомов определялось как разность указанных составов.

Следует отметить, что метод МСТР имеет несколько существенных особенностей, а именно: а) метод является разрушающим; б) процесс регистрации элементного состава исследуемого образца выполняется последовательно. Поэтому, для исследования необходим образец, который имел бы однородный химический состав по глубине. Из этих особенностей следует, что фронтальный анализ состава поверхности накопительных экранов содержащих слой осажденного вещества мишени даст искаженную картину. Для получения образца с однородным составом по глубине была построена сборка из накопительных экранов (Рис. 22), участвовавших в идентичных экспериментах, состав которой анализировался на поперечном сечении. Таким образом, в область анализа масс-спектрометра (\varnothing 5 мм) попадало не менее 10 поперечных сечений накопительных экранов, что обеспечивало высокое усреднение измеряемой величины.

Использованная процедура по своей сути является прямым измерением искомой величины, позволяя проанализировать состав всего накопительного экрана при этом абсолютно исключить интерпретацию факта обогащения поверхности накопительного экрана за счет процесса перераспределения примеси из его объема.

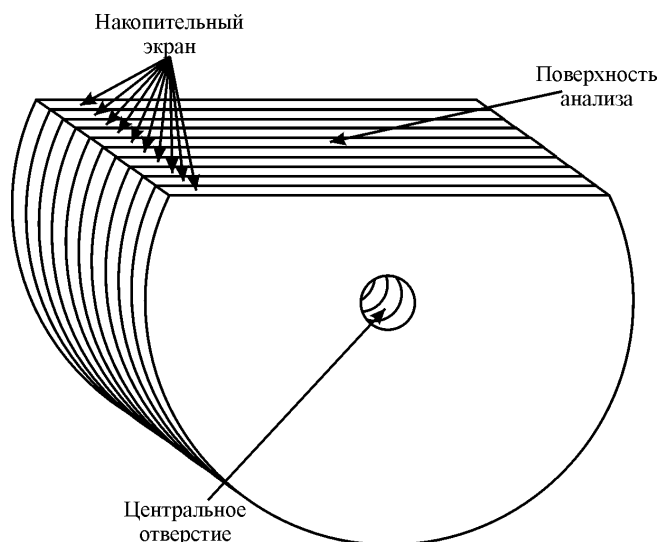


Рис. 22. Схема образца для интегрального исследования методом МСТР.

В результате обработки данных исследования методом МСТР сборки из медных (Cu 99.99 масс. %) накопительных экранов толщиной 0.5 мм после экспериментов со свинцовыми мишенями (Pb 99.96 масс. %) было рассчитано общее количество перерожденных атомов, осажденных на одном экране в результате взрыва мишени 6.27×10^{18} , что эквивалентно массе **0.34 мг**.

Аналогичные исследования были проведены на сборке из медных экранов толщиной 0.2 мм после экспериментов с серебряными мишенями (Ag 99.95 масс. %). Расчетное количество перерожденных атомов, осажденных на одном экране в результате взрыва мишени 3.48×10^{18} , что эквивалентно массе **0.31 мг**.

Эти данные хорошо согласуются с данными локального анализа МРСА и данными, полученными в экспериментах по нейтрализации радиоактивности.

Сопоставление результатов локального и интегрального анализа элементного состава материалов мишеней и накопительных экранов до и после эксперимента показали, что:

1. Продукты взрывного поражения мишени содержат широкий спектр легких, средних и тяжелых химических элементов, с концентрацией на несколько порядков превышающую концентрацию в исходных материалах.
2. В осажденном веществе увеличены концентрации тяжелых элементов, атомные массы которых превышают атомную массу исходных материалов мишени более чем в два раза.
3. В состав осажденного вещества входят химические элементы, отсутствующие в исходных материалах мишеней, накопительных экранов, всех исходных образцов и деталей экспериментальной установки.

Анализ изотопного состава инертных газов в остаточной атмосфере вакуумной камеры

Основной задачей было определение соотношения изотопов аргона (Ar) в пробах, отобранных из реакционной камеры, в которой проводились эксперименты по высокоэнергетическому воздействию на мишень.

Результаты измерений изотопного состава показали, что пробы содержат аномальные значения отношения $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ (Рис. 23).

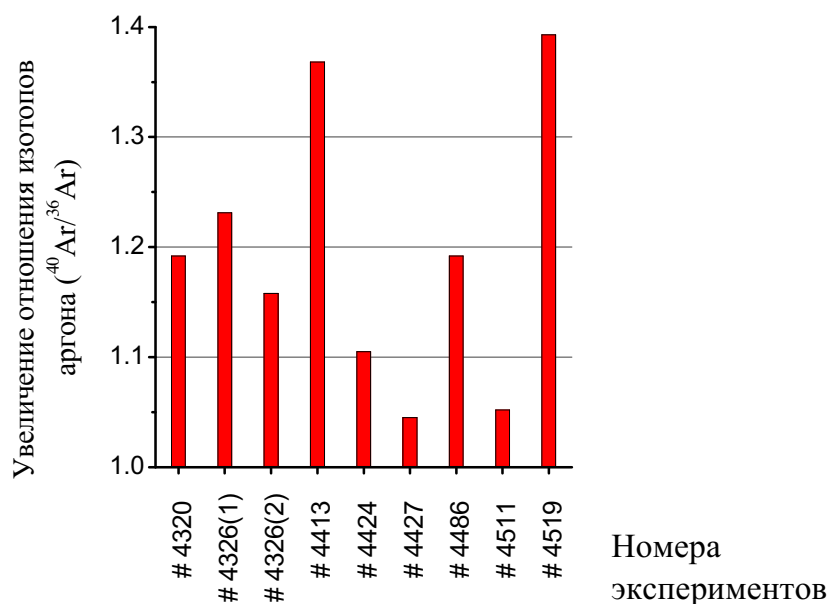


Рис. 23. Увеличение отношения $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ в вакуумной камере по сравнению с атмосферным. Метод исследования — масс-спектрометрия (MI-1201IG).

Анализ изотопного состава продуктов взрыва мишени, осажденных на накопительном экране

Анализы изотопного состава накопительных экранов проводились масс-спектрометрическими методами. Результаты измерений показали, что большинство проанализированных микродоз вещества мишени осажденного на поверхности накопительных экранов, имеет измененное соотношение изотопов по сравнению с природным (Рис. 24, 25).

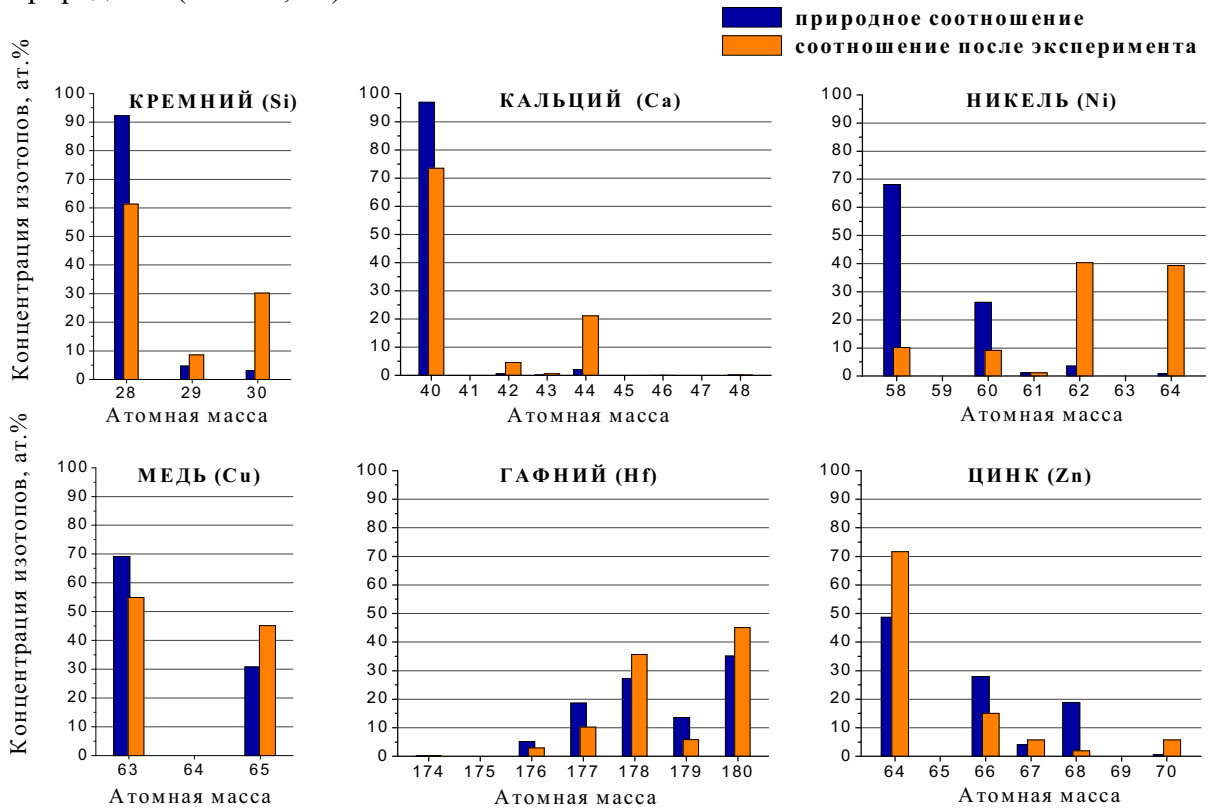


Рис. 24. Примеры аномальных соотношений изотопов, некоторых химических элементов, зарегистрированных на поверхности накопительных экранов. Метод исследования — вторичная ионная масс-спектрометрия (IMS-4f).

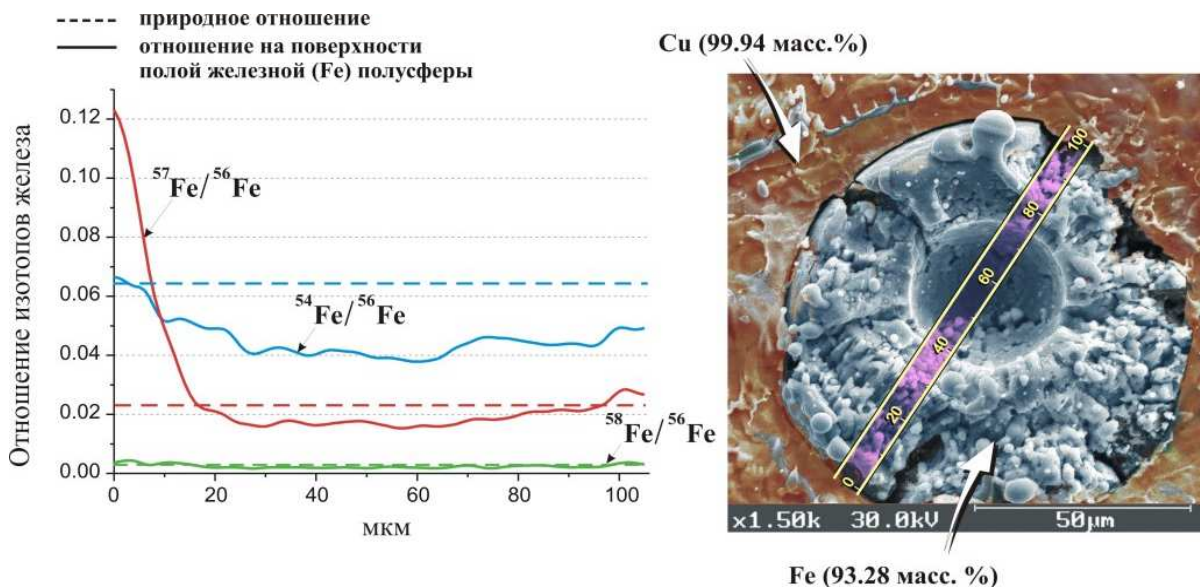


Рис. 25. Аномальное отношение изотопов железа на поверхности полой железной (Fe) полусферы, обнаруженной на поверхности медного накопительного экрана после эксперимента с медной мишенью. Метод исследования — вторичная ионная масс-спектрометрия (IMS-4f).

Анализ распределения различных химических элементов по глубине в накопительных экранах

В процессе исследований методом вторичной ионной масс-спектрометрии элементного и изотопного состава приповерхностных слоев накопительных экранов после эксперимента, были обнаружены неравномерные распределения концентраций химических элементов по глубине (Рис. 26 – 28). Особенность этих распределений состоит в том, что примесные химические элементы имеющие разные атомные массы и заряды образуют на одинаковой глубине слой с максимальной концентрацией. Глубина залегания меняется от эксперимента к эксперименту.

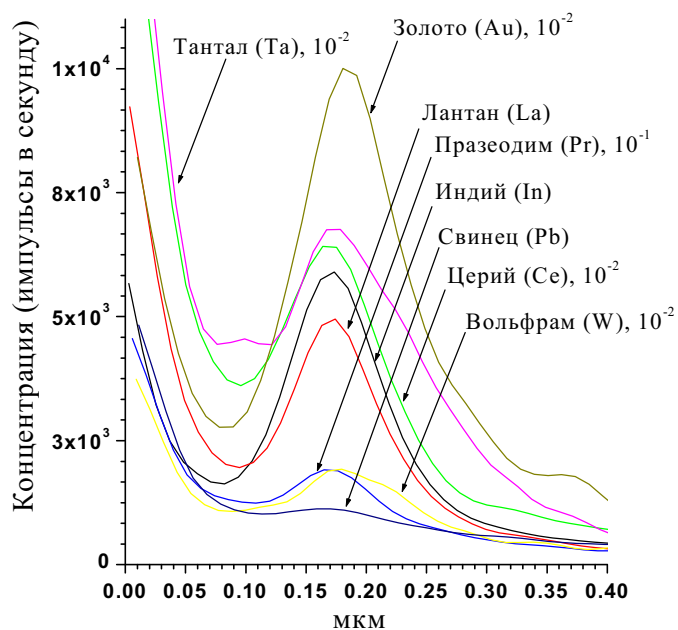


Рис. 26. Концентрационные максимумы в экране после эксперимента №2670
Материал мишени и экрана — медь (Cu 99.99 масс. %).

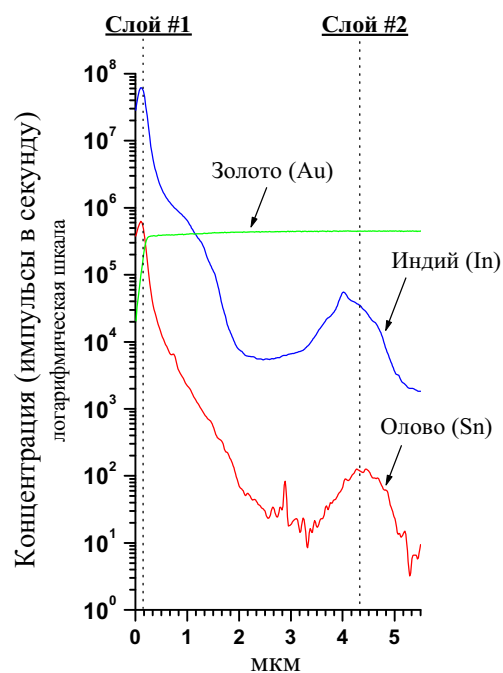


Рис. 27. Концентрационные максимумы в экране после эксперимента №1855
Материал мишени и экрана — золото (Au 99.91 масс. %).

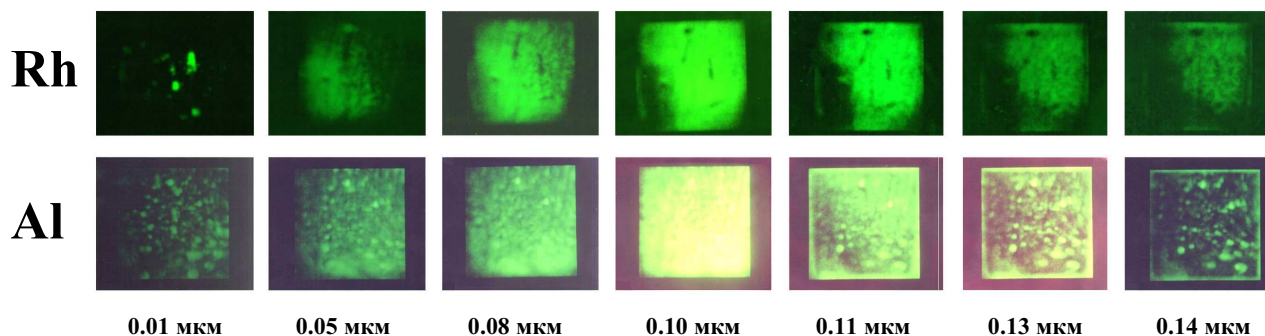


Рис. 28. Распределение концентрации родия (Rh) и алюминия (Al) по глубине после эксперимента №2828, изображение во вторичных ионах.
Размер изображения 0.5×0.5 мм.
Материал мишени — свинец (Pb 99.91 масс. %), материал накопительного экрана — медь (Cu 99.99 масс. %).
Интенсивность засветки пленки пропорциональна концентрации элемента.

Нейтрализация радиоактивного изотопа кобальта (^{60}Co)

Параллельно с экспериментами, в которых использовались нерадиоактивные мишени, была проведена серия экспериментов с мишенями, в состав которых входил радиоактивный изотоп кобальта ^{60}Co с периодом полураспада 5.5 лет.

Герметичность вакуумной камеры и положение детекторов оставались неизменными в течение всего эксперимента (Рис. 29). Активность мишеней регистрировалась с помощью Ge(Li) – детекторов объемом 160 см^3 и разрешением 2.2 кэВ на γ - линии 1333 кэВ.

При подсчете остаточной активности мишени после воздействия учитывались факторы распыления мишени в объеме корпуса, а также изменение поглощения гамма-квантов стенками корпуса из-за перераспределения активности в корпусе.

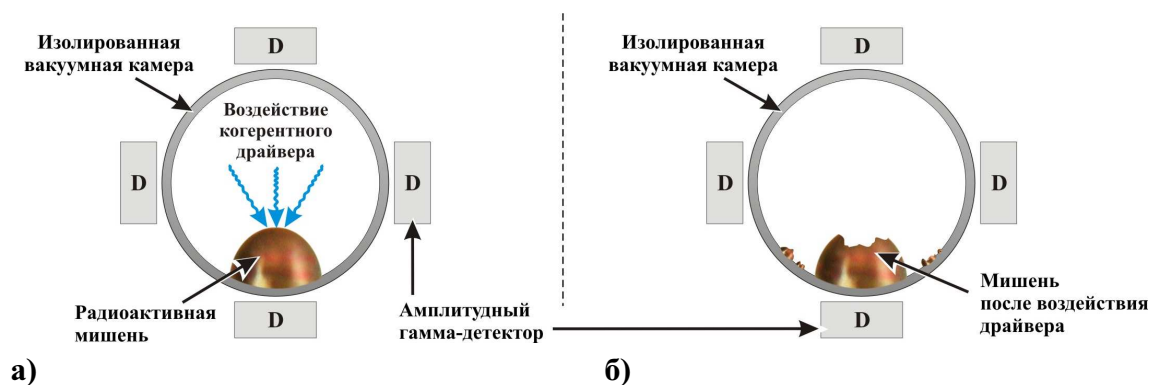


Рис. 29. Схема эксперимента по нейтрализации гамма-активной мишени, демонстрирующая начальное состояние образца (а), и его состояние после эксперимента (б).

В среднем, в результате воздействия на мишень интенсивность спектральных линий ^{60}Co уменьшалась на величину, эквивалентную трансмутации порядка 10^{18} ядер мишени, в то время как линии других радиоактивных элементов не появлялись (Табл. 6).

Таблица 6. Снижение гамма-активности ^{60}Co после эксперимента

Образец №	Снижение гамма-активности, %	Образец №	Снижение гамма-активности, %	Образец №	Снижение гамма-активности, %
2397	47.6	2479	2.2	2588	46.5
2398	10.7	2481	22.8	2600	33.3
2425	21.6	2534	29.5	2769	28.9
2426	17.0	2558	22.9	2770	36.4

Неординарные результаты

Анализы результатов экспериментов с использованием мишеней из платины (Pt), свинца (Pb), и висмута (Bi) показали, что на поверхности накопительных экранов образуются долгоживущие изотопы тяжелых химических элементов с атомными номерами на границе и за пределами известной части Периодической таблицы.

Обнаружение неидентифицируемых масс атомарных ионов с массовым числом >220 а.е.м. в приповерхностных слоях накопительных экранов методом вторичной ионной масс-спектрометрии

Особенность неидентифицируемых масс состояла в следующем:

- массы отсутствовали в обзорных спектрах эталонных материалов;
- распределение неидентифицируемых масс не совпадало с распределением других химических элементов на анализируемой поверхности;
- при увеличении смещающего напряжения в режиме Offset интенсивность не идентифицируемых пиков возрастала относительно интенсивности пиков кластеров других химических элементов, зарегистрированных на анализируемой поверхности.

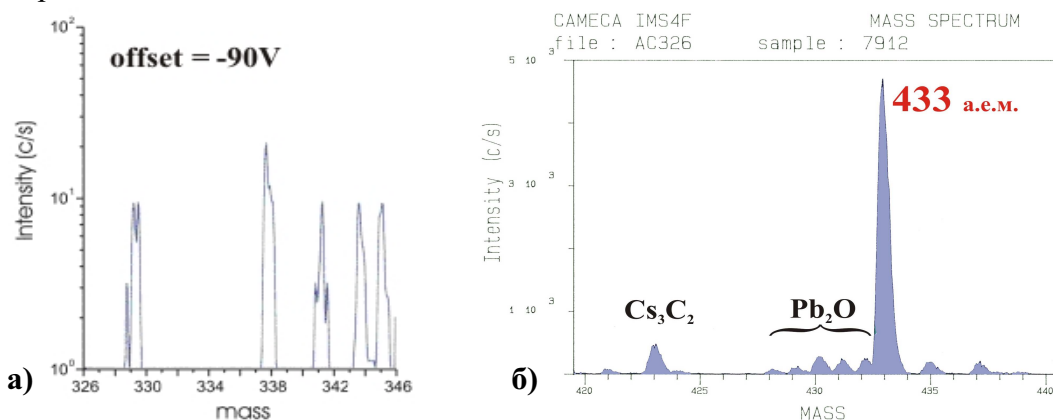


Рис. 30. Вторичная ионная масс-спектрометрия (IMS-4f, диапазон анализируемых масс — до 500). Неидентифицируемые атомные массы. а) в диапазоне от 326 до 346 а.е.м., б) 433 а.е.м.

Регистрация в энергетических спектрах рассеянных α -частиц и ионов азота (^{14}N) центров рассеяния, соответствующих массовым числам > 200 а.е.м.

Учитывая специфические особенности мишеней, содержащих продукты синтеза, была разработана и реализована времяпролетная методика идентификации тяжелых ионов для исследования обратного кулоновского рассеяния α -частиц и ионов ^{14}N на ядрах, составляющих поверхностные слои мишеней.

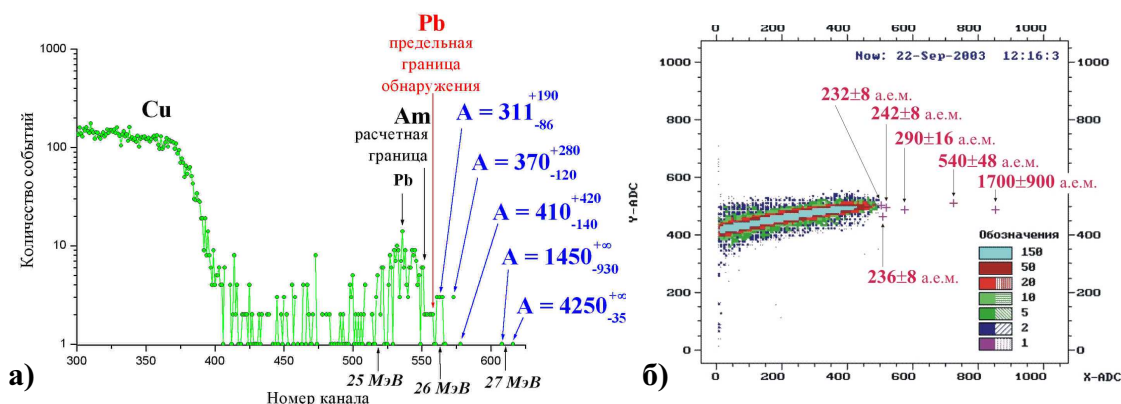


Рис. 31. Обратное Резерфордское рассеяние:
 а) на угол 135° α -частиц, ускоренных до энергии 27.2 МэВ;
 б) на угол 150° ионов азота (^{14}N) с начальной энергией 8.7 МэВ (образец № 8163).

Обнаружение неидентифицируемых пиков характеристического рентгеновского и оже-излучения при анализе элементного состава поверхности накопительных экранов

На поверхности накопительных экранов были зарегистрированы неидентифицируемые оже-пики с энергией 172, 527, 1096, 94, 560 эВ и дублет пиков с энергией 130 и 115 эВ (Рис. 32). Эти оже-пики не являются оже-пиками химических элементов, присутствующих в существующих атласах и каталогах оже-электронных спектров, а также не относятся к таким явлениям как электрическая зарядка, характеристические потери энергии и химический сдвиг.

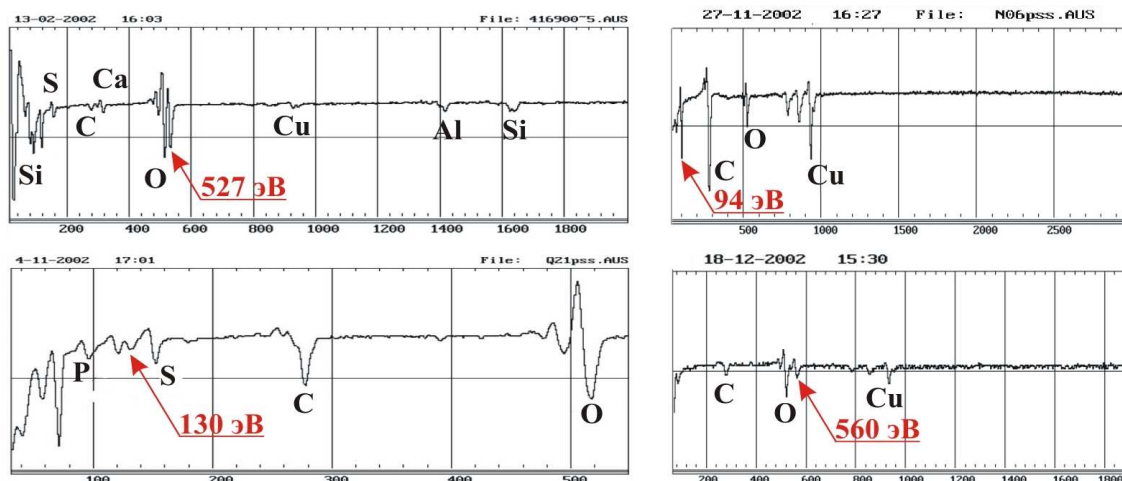


Рис. 32. Оже-спектроскопия (JAMP-10S, диапазон анализируемых элементов — все, кроме H и He). Неидентифицируемые оже-пики химических элементов с энергиями 527, 94, 130, 560 эВ.

На поверхности накопительного экрана образца №8545 зарегистрированы неидентифицируемые пики характеристического рентгеновского излучения малой интенсивности с энергией 23.582 и 28.943 кэВ (Рис. 33). Данные пики не относятся к известному артефакту анализа, как пики «сумм» образующихся в результате попадания в детектор рентгеновского излучения двух гамма квантов различной энергии одновременно. Амплитуда зарегистрированных мало интенсивных пиков превышала среднеквадратичную флуктуацию рентгеновского фона более чем в три раза, что свидетельствует о высокой степени достоверности регистрации пиков.

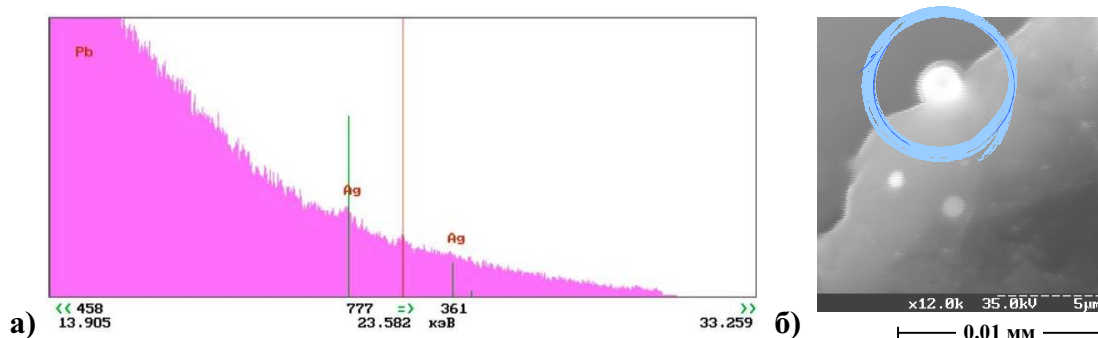


Рис. 33. Микрорентгеноспектральный анализ (РЭММА102, диапазон анализируемых элементов — все, начиная с В):
 а) неидентифицируемый пик рентгеновского излучения на образце №8545 с энергией 23.582 кэВ, предполагаемый заряд ядра 118-119;
 б) фотография локализации неидентифицируемого пика.

Результаты исследований образцов в ведущих зарубежных научно-исследовательских центрах

Выдержки из официального заключения ПО «Луч» (Минатом России) об анализируемых объектах, предоставленных фирмой «ПРОТОН-21» для масс-спектрометрического анализа на приборе «Finnigan» MAT – 262

«Анализ изотопного состава образцов показал, что все образцы, за исключением контрольного, имеют значительные отклонения от природного изотопного соотношения по многим элементам: Si, K, Ca, Ti, Cr, Fe, Zn, Zr (Рис. 34), Ba и другие. Эти отклонения весьма существенны и лежат далеко за пределами ошибок.

Кроме того, на масс-спектрах обнаружены массы 253, 264, 394, 395, 433, 434, не поддающиеся интерпретации и идентификации, то есть, отсутствующие среди всех известных изотопных комбинаций, приведенных в типовых каталогах».

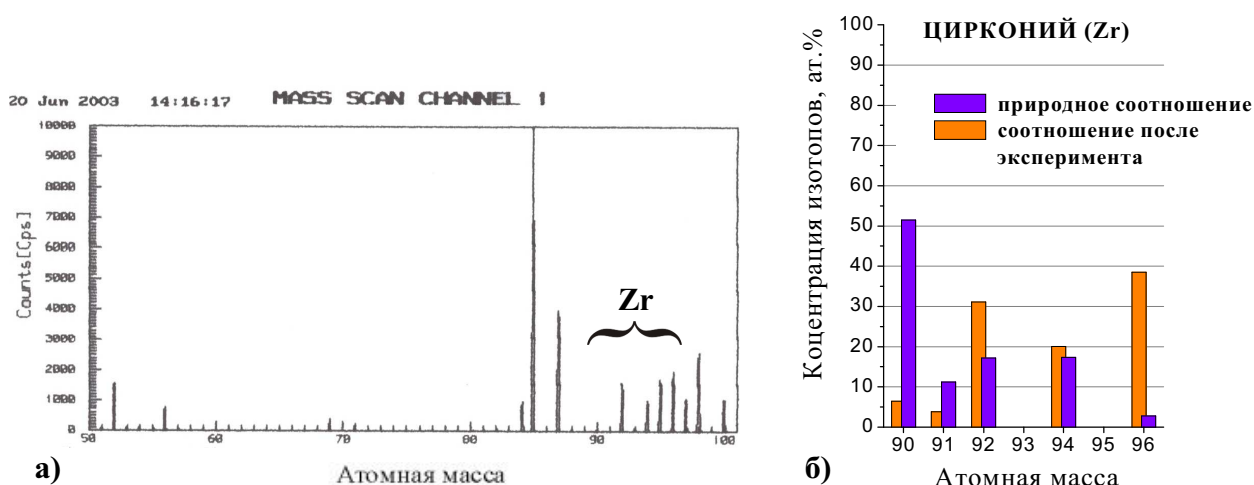


Рис. 34. Термоионизационная масс-спектрометрия (MAT-262, диапазон анализируемых масс – до 470). Отклонение изотопного состава циркония (Zr):
а) масс-спектр;
б) сравнительная гистограмма.

Выдержки из официального заключения MICRO PHOTONICS (Surface Test), REPORT SIMS – 030623 for UNITED METALS LLC (USA) (в переводе)

«...обнаружено присутствие тяжелых ионов с массами: 221, 222, 223, 224, 225, 226, 232, 233, 235, 236, 239, 240, 241, 243, 247, 257, 259, 263, 265, 266».

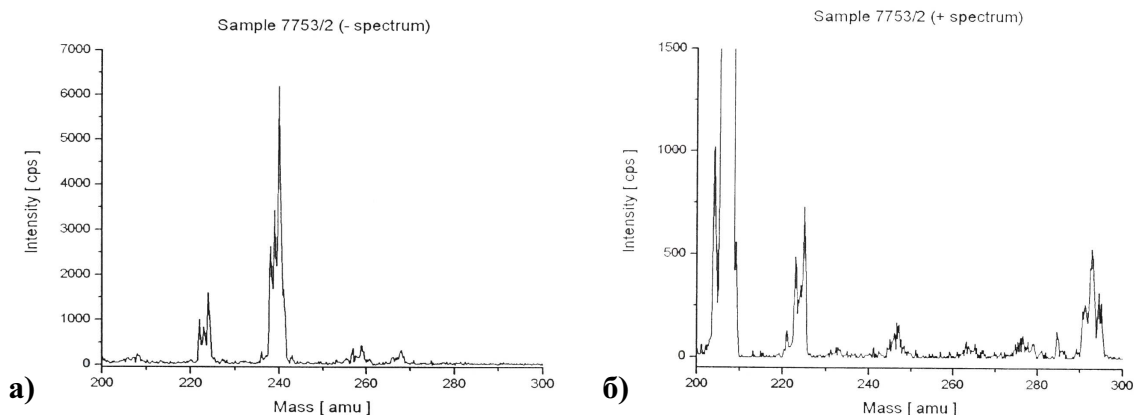


Рис. 35. Вторичная ионная масс-спектрометрия (SIMS, диапазон анализируемых масс – до 300). Неидентифицируемые атомные массы. Масс-спектр записан:
а) в отрицательных;
б) в положительных ионах.

Результаты и выводы

Результаты исследований сводятся к следующему:

- Эффективность ядерных превращений зависит от начального состава мишеней и составляет примерно $10^{15} - 10^{16}$ синтезированных ядер на 1 Дж вложенной энергии;
- В продуктах лабораторного нуклеосинтеза интенсивность излучения α -, β - и γ -активных изотопов не превышает фоновый уровень. Многократная проверка на накопительных γ - и β - спектрометрах показала, что относительная концентрация радиоактивных ядер всех синтезированных изотопов составляет $\eta \approx 10^{-8} \div 10^{-12}$;
- Активность мишеней, содержащих радиоактивные изотопы, уменьшается после ударного воздействия на величину, эквивалентную трансмутации $\sim 10^{18}$ ядер фокальной (находящейся в фокусе высокоэнергетического воздействия) зоны мишени (при энергии драйвера до 1 кДж), абсолютная величина уменьшения активности прямо пропорциональна концентрации радиоактивных ядер в фокальной зоне мишени;
- Кинетическая энергия корпускулярной компоненты рождающегося плазменного сгустка (ионов и электронов), составляет величину порядка 0.8 кДж;
- В процессе формирования, эволюции и распада электронно-ядерного коллапса за время $\sim 10^{-8}$ секунды регистрируется точечный источник рентгеновского излучения с максимумом спектра гамма-квантов в районе 35 кэВ;
- В продуктах взрывного разрушения мишени обнаруживается присутствие атомов долгоживущих изотопов сверхтяжелых химических элементов.

Из этих результатов можно сделать следующие выводы:

- В веществе мишени, ударно сжимаемой до сверхвысоких плотностей, инициируются ядерные реакции нуклеосинтеза и трансмутации, что подтверждается:
 - 1) увеличением на несколько порядков концентраций химических элементов, входящих в состав примесей основного материала мишени;
 - 2) появлением на поверхности образцов после эксперимента химических элементов, отсутствовавших в химическом составе всех исходных образцов и деталей экспериментальной установки, а также в воздухе и остаточной атмосфере вакуума;
 - 3) существенным нарушением соотношения изотопов химических элементов, в том числе благородных газов в объеме рабочей камеры;
 - 4) снижением гамма-активности материалов мишеней, содержащих радиоактивные изотопы кобальта (Co), серебра (Ag) и цинка (Zn).
- Протекающие в мишени ядерные превращения носят коллективный, многочастичный характер, что подтверждается наличием в продуктах ядерных превращений значительного числа ($> 10^{16}$) ядер, массы которых более чем в два раза превышают массы ядер исходного вещества мишени;
- Разработанный драйвер демонстрирует высокую воспроизводимость в достижении такого динамического состояния макроколичеств сжатого вещества, при котором протекают коллективные многочастичные реакции в макрообъеме вещества;
- Полученные экспериментальные данные показывают, что когерентное импульсное воздействие на холодное, конденсированное вещество в состоянии инициирует процесс лавинной концентрации энергии, в результате чего в веществе, подвергнувшись воздействию, протекают энергетически выгодные ядерные реакции.