

УДК 533.9.082

РЕГИСТРАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОВ ИОНОВ АЛЮМИНИЯ С ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ ПРИ СЖАТИИ ПРОВОЛОЧНЫХ СБОРОК МЕГААМПЕРНЫМИ ТОКАМИ

С.С. Ананьев, С.А. Данько, Ю.Г. Калинин (ИЯС РНЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия)

В представленной работе описана экспериментальная методика регистрации временного хода рентгеновских линий водорода- и гелие- ([H]- и [He]-) подобных ионов алюминия. Регистрация спектров производилась в экспериментах по имплозии алюминиевых проволочныхборок на установке С-300 мегаамперными токами в условиях больших электромагнитных наводок, возникающих при срабатывании установки. Для получения спектров [H]- и [He]-подобных ионов алюминия использовался фокусирующий спектрограф со сферическим кристаллом слюды. Сцинтиллятор, нанесённый на торец световода, обладающего пространственным разрешением, преобразовывал рентгеновское излучение в видимый свет. Второй конец световода присоединялся к фотокатоду электронно-оптического хронографа. Изображение с экрана последнего регистрировалось с помощью ПЗС-камеры и по волоконно-оптической связи передавалось на удалённый компьютер.

Ключевые слова: диагностика горячей плотной плазмы, быстрые Z-пинчи, электронно-оптический хронограф, рентгеновская спектроскопия, измерение рентгеновского излучения с временным разрешением.

TIME RESOLVED X-RAY SPECTRAL LINE REGISTRATION IN THE EXPERIMENTS OF MULTIWIRED ALUMINUM ARRAY IMPLOSION AT MEGA-AMPERE ELECTRICAL CURRENT. S.S. ANAN'EV, S.A. DAN'KO, Yu.G. KALININ. In the presented work time-resolved experimental technique of x-ray lines registration is presented. Spectra of hydrogen - and helium- ([H]- and [He]-) like aluminium ions were obtained in experiments on aluminium wire arrays implosion at S-300 machine under conditions of severe electro-magnetic shock. Spectral lines of [H]- and [He]-like ions of aluminium were obtained by spherical focusing mica crystal. X-ray spectral lines image was transformed into visible radiation by scintillator, applied on a front side of an optical fibre. The opposite side of the optical fibre was connected to streak-camera. The spectral trace image from the streak-camera screen was transferred by means of the CCD camera and fibre-optic connection to personal computer.

Key words: diagnostics of hot dense plasma, fast Z-pinch, streak camera, time-domain x-ray spectrometry.

ВВЕДЕНИЕ

Рентгеновские спектры многозарядных ионов являются, пожалуй, основным источником информации о состоянии плотной горячей короткоживущей плазмы. К настоящему времени выполнено большое количество работ, как экспериментальных, в которых исследовались рентгеновские спектры различных импульсных плазменных образований, так и расчётно-теоретических, позволяющих адекватно интерпретировать полученные результаты. Естественно, однако, что для определения параметров и особенностей динамики короткоживущей, с характерным временем эволюции $\sim 10^{-8}$ с, горячей плазмы по рентгеновским спектрам высокозарядных ионов недостаточно знать интегральное по времени значение энергии, излучённой в тех или иных спектральных линиях. При интерпретации интегральных спектров обычно предполагается, что они формируются в момент времени, когда плазма достигает экстремальных параметров, что далеко не всегда справедливо. Основная неоднозначность интерпретации интегральных спектров связана с существенным изменением конфигурации плазмы, её температуры, плотности, а также ионизационного состояния за время исследуемого процесса, к тому же плазма часто оказывается неравновесной. В соответствии со сказанным регистрация временного хода интенсивностей характеристических линий ионов является обязательным условием надёжного определения параметров горячей плазмы на импульсных установках.

Однако в подавляющем большинстве подобных экспериментов спектры регистрировались без временного разрешения. Причиной этому являются экспериментальные трудности, число которых существенно возрастает при работе на сильноточных генераторах мегаамперного диапазона. В представленной работе описана экспериментальная методика регистрации временного хода рентгеновских линий [H]- и [He]-подобных ионов алюминия при имплозии алюминиевых проволочныхборок на установке С-300 [1].

Методы временной регистрации рентгеновских спектров по числу спектральных каналов можно разбить на два условных класса: дискретный, когда число каналов составляет несколько единиц, и «непре-

рывный», оперирующий с сотнями каналов. В первом случае несколько участков спектра, как правило, наиболее яркие линии, после спектрографа выводятся каждый на свой датчик — рентгеновский диод [2], сцинтилляционный регистратор и т.д. — аналог регистрации временного хода интенсивностей нескольких оптических спектральных линий, каждая на своём фотоумножителе. Естественным его недостатком является плохое спектральное разрешение, определяемое достаточно большим размером приёмника и малым числом спектральных каналов. Во втором случае вместо отдельных датчиков используется электронно-оптический преобразователь (ЭОП). Спектральное разрешение $\delta\lambda$ в таком случае определяется свойствами всей системы, причем ограничивающим фактором, как правило, является пространственное разрешение электронно-оптической камеры. Число спектральных каналов, естественно, определяется величиной $\Delta\lambda/\delta\lambda$, где $\Delta\lambda$ — область дисперсии системы. Редкими примерами реализации подобных схем в кадровом и хронографическом режимах являются работы [3, 4] соответственно.

СХЕМА РЕГИСТРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОВ

В цитированных работах [3, 4] использовались открытые рентгеновские электронно-оптические преобразователи (РЭОПы), обладающие хорошей чувствительностью и высоким временным разрешением. Мы для своих экспериментов выбрали схему с преобразованием сцинтиллятором рентгеновского спектра в оптическое изображение, которое передается гибким волоконным световодом для регистрации на световом хронографе. Проигрывая по чувствительности схеме, использующей открытые РЭОПы, и имея принципиальное ограничение по временному разрешению (время высвечивания лучших сцинтилляторов не менее 0,1 нс, а обычно 2—5 нс), она является более удобной в эксплуатации. Основным её достоинством является возможность относительно легко варьировать спектральный интервал регистрации излучения, изменяя угол падения излучения на кристалл и взаимное расположение кристалла и сцинтиллятора. Рентгеновская регистрирующая камера в отличие от световой жёстко задаёт спектральный интервал измерений положением вакуумно-плотного соединения. Помимо этого, во внутреннем объёме открытого РЭОПа должен поддерживаться высокий вакуум, причём преобразователь должен быть отделён от основной вакуумной камеры, поскольку импульсное выделение газа в момент «выстрела» и разлёт фрагментов нагрузки может привести к его электрическому пробое и механическим повреждениям.

Схема регистрации спектров представлена на рис. 1. Для регистрации спектральных линий водорода- и гелиеподобных ионов алюминия (7—8 Å) в экспериментах с многопроволочными алюминиевыми нагрузками был выбран сферический фокусирующий кристалл слюды с межплоскостным расстоянием $d = 9,906973$ Å. Кристалл с радиусом кривизны 150 мм располагался на удалении 2,5 м от источника излучения, представлявшего собой плазменное образование высотой около 15 мм и поперечным размером 1—3 мм. Возможность фокусировки излучения как в плоскости дисперсии, так и в сагиттальной (поперёк плоскости дисперсии) плоскости позволяет в несколько раз увеличить светосилу прибора по сравнению с другими кристаллами. Небольшие угловые размеры источника в плоскости дисперсии, сов-

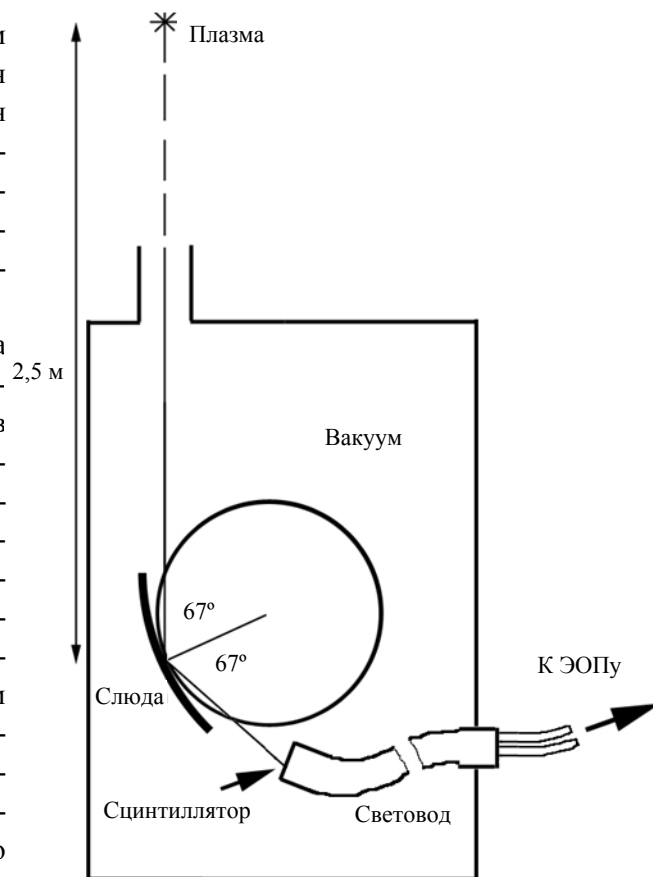


Рис. 1. Схема регистрации спектра

падавшей с горизонтальной плоскостью, делали возможным смещение (в пределах 20—30 мм) сцинтиллятора от круга Роуланда для достижения вертикальной фокусировки без существенного ухудшения спектрального разрешения. Сцинтиллятор (полистирол с *p*-терфенилом толщиной ~20 мкм) с характерным временем высвечивания 2,5 нс располагался непосредственно на торцевой поверхности волоконного световода. Специальная диафрагма высотой 7,5 мм ограничивала поле зрения спектрографа таким образом, чтобы электроды генератора С-300 в него не попадали.

Средний угол падения излучения на кристалл составлял 67°. Спектр фокусировался в вертикальном направлении на плоскости сцинтиллятора, удаленного от кристалла на ~83 мм. При этом самые яркие линии водородо-, гелиеподобного спектра алюминия укладывались в отрезок 12 мм. Световод круглого сечения диаметром 30 мм и длиной 50 см переносил входное изображение с пространственным разрешением ~20 мкм. Выходной конец световода, выполненный в виде шайбы, залитой эпоксидной смолой, выходил в атмосферу через кольцевое вакуумное уплотнение. К торцу выходной шайбы круглого световода пристыковывались два плоских световода сечением 2×6 мм, которые двумя микрометрическими винтами могли плавно перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях по поверхности большой волоконной шайбы в нужную позицию (рис. 2). С помощью этих световодов, «посаженных» на оптический контакт с входной волоконно-оптической шайбой камеры, два интересующих нас спектральных участка переносились на фотокатод последней. Заметим, что возможность перемещения световодов по спектру позволяет оптимально использовать размер фотокатода, если расстояние между исследуемыми участками спектра больше высоты фотокатода камеры. Это обстоятельство также выгодно отличает схему с преобразованием рентгеновского спектра в оптический от его непосредственной регистрации на РЭОПе.

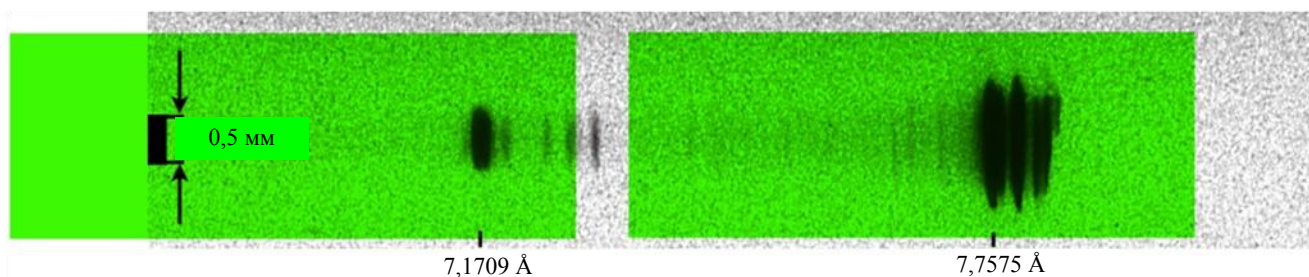


Рис. 2. Интегральный во времени спектр [H]- и [He]-подобных ионов алюминия, зарегистрированный на фотоплёнку Kodak CX. Минимальная высота линий — около 0,5 мм. Тёмными прямоугольниками обозначено положение двух волоконных световодов

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА СИЛЬНОТОЧНОМ ГЕНЕРАТОРЕ С-300

Существенной особенностью работы на мощном импульсном генераторе С-300 является наличие сильных электромагнитных наводок в момент срабатывания установки, которые особенно опасны в случае размещения регистрирующей аппаратуры непосредственно у разрядной камеры. Для защиты от них необходимо было принять специальные меры: надёжную экранировку регистрирующей аппаратуры, обеспечение её системой автономного питания, позволяющей избежать гальванической связи регистрирующей электроники с сетью питания и контуром разряда генератора. Все эти проблемы удалось относительно легко решить благодаря применению компактной (400×90×180 мм) и экономичной (10 Вт потребляемой мощности) электронно-оптической камеры К008 производства БИФО-компании [5], позволившей разместить в небольшом экранированном ящике на выходе вакуумного канала С-300 саму камеру, осциллограф Tektronix TDS-3054 и источник бесперебойного питания (UPS) для персонального компьютера. Низкое энергопотребление камеры и осциллографа даёт им возможность функционировать с отключенным от внешней сети UPS не менее 5 минут, что вполне достаточно для эксперимента. Отверстия в ящике для световодов были выполнены в виде запердельных волноводов.

На кабели пускового сигнала и сигнала производной тока через нагрузку, необходимого для точной синхронизации, надевались дополнительные экраны, которые подсоединялись к экрану-ящику, гальванически развязанному с землёй установки. Запуск камеры осуществлялся импульсом, получаемым в результате дифференцирования сигнала с делителя напряжения формирующей линии генератора. Это позволило миними-

зировать разброс между запускающим импульсом и началом нарастания тока через нагрузку. Для защиты от помех по каналу запуска амплитуда запускающего сигнала бралась наибольшей (в нашем случае 1,6 кВ). Этот сигнал с помощью двухступенчатого делителя, установленного непосредственно на экранированном боксе с камерой, ослаблялся в 45 раз, чтобы согласовать его уровень с пороговым значением запуска камеры 27 В. Далее он разветвлялся и подводился на вход камеры и вход осциллографа кабелями одинаковой длины с нагрузками 50 Ом на концах. Для определения задержки начала развёртки на экране камеры относительно момента, когда значение запускающего сигнала достигало максимального порогового значения 27 В, была проведена калибровка последней с помощью быстрого диодного лазера.

Точность синхронизации начала развёртки относительно физического процесса оценивалась нами не хуже 3 нс. Влияния помех, вызванных срабатыванием сильноточного генератора, на работу электронно-оптической камеры и осциллографа нами обнаружено не было.

Камера K008 может работать либо в режиме щелевой развёртки, либо в режиме одного кадра с регулируемой длительностью экспозиции, что очень удобно для настройки всей системы. Регистрация изображения на выходе камеры производится с помощью ПЗС считывающего устройства — телевизионной камеры (ТВК) с выводом изображения на компьютер. Программное обеспечение, поставляемое в комплекте с камерой, предоставляет пользователю широкие возможности обработки изображения.

Компьютер, несмотря на то, что находился на значительном удалении от установки в экранированной диагностической кабине, во избежание сбоев в работе помещался в экранированный корпус и отключался от сети питания на время эксперимента.

Для разрыва гальванической связи между ТВК и компьютером был применён волоконно-оптический удлинитель USB, на концах которого находились два приёмо-передающих устройства. Питание одного из них осуществлялось через разъём USB компьютера, а второго — через компактный блок питания от UPS в экранированном боксе. Для передачи информации с ТВК на компьютер использовался интерфейс USB. Нами был использован имеющийся простейший удлинитель, поддерживающий USB 1.0. Хотя максимальная скорость работы устройства достигается при использовании интерфейса USB 2.0, возможно использовать и более медленное устройство USB 1.0. При запуске камеры с частотой ниже 0,1 Гц его пропускной способности было вполне достаточно, хотя наблюдалась задержка в передаче данных. Схема комплекса регистрирующей аппаратуры изображена на рис. 3.

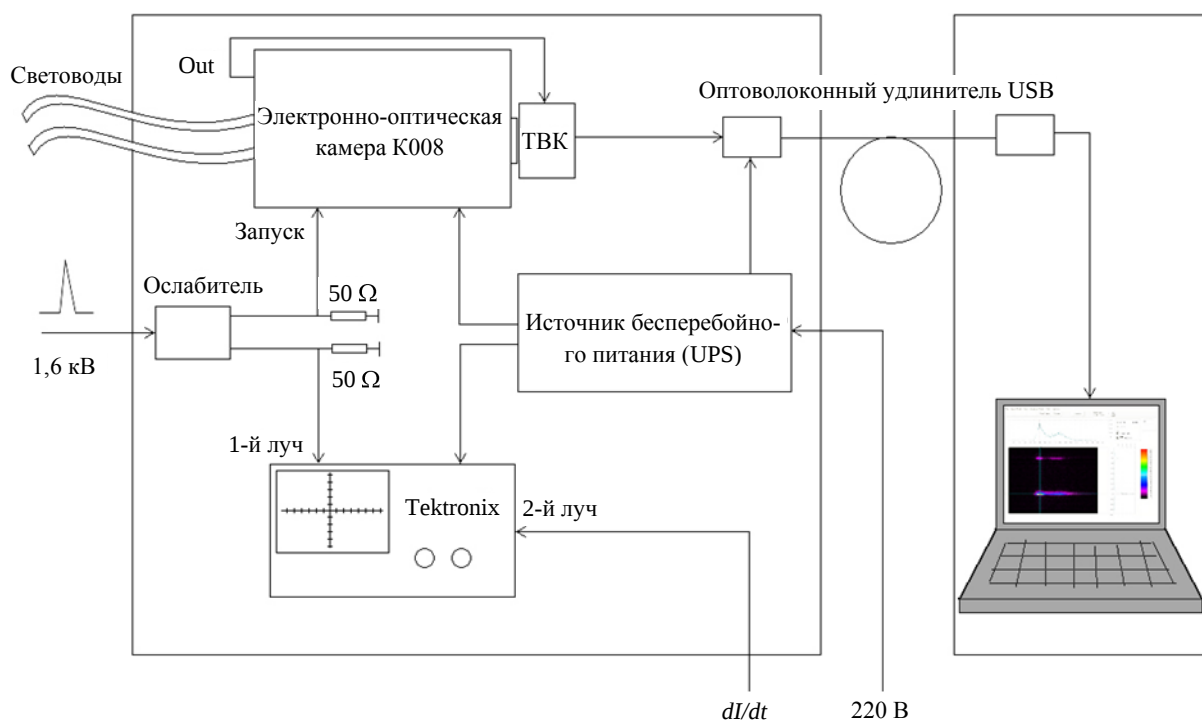


Рис. 3. Схема регистрирующей аппаратуры

СПЕКТРАЛЬНОЕ И ВРЕМЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

Спектральное разрешение схемы определяется дисперсией и спектральным разрешением спектрографа и пространственным разрешением системы регистрации: сцинтиллятора, световодов и электронно-оптической камеры. Пространственное разрешение последней в режиме развертки хуже, чем в статике. Средняя величина линейной дисперсии спектрографа в плоскости сцинтиллятора составляла $0,15 \text{ \AA}/\text{мм}$. В спектре, полученном на фотоплёнке, помещённой на место сцинтиллятора, разрешаются линии шириной 20 мкм , что соответствует пространственному разрешению $25 \text{ п.л.}/\text{мм}$. Определить пространственное разрешение регистрирующей системы в целом можно, поместив на сцинтиллятор щелевую миру. На фотографиях щелевой миры (рис. 4) видно, что в хронографическом режиме хорошо различима область с 5 и 10 п.л./мм. Области с 15 и более парами линий на миллиметр становятся трудноразличимыми. В соответствии с разрешением $10 \text{ п.л.}/\text{мм}$ $\delta\lambda \approx 0,015 \text{ \AA}$ и $\lambda/\delta\lambda \approx 500$.

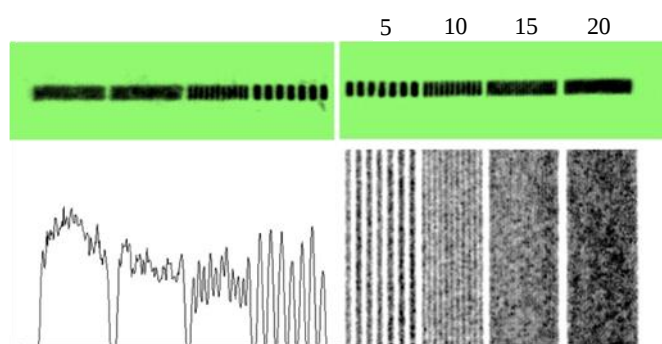


Рис. 4. Фотография щелевой миры в статике и динамике (развёртка направлена вертикально). Прямоугольниками сверху обозначено положение световодов относительно миры. Цифры возле рангов щелевой миры указывают соответствующее число пар линий на миллиметр. Слева снизу приведена денситограмма сечения временной развёртки миры для одного из световодов

Временное разрешение системы определялось двумя основными факторами: временем высвечивания сцинтиллятора ($2,5 \text{ нс}$) и шириной «щели» ЭОПа. Декларируемое производителем прибора временное разрешение на развёртке 200 нс на экран составляет 2 нс . В явном виде входная время-анализирующая щель отсутствовала, и её роль играла высота спектра, составлявшая в различных линиях от $0,5$ до 1 мм , что для развёртки длительностью 200 нс и длиной 20 мм по экрану ЭОПа соответствует временному разрешению $5\text{—}10 \text{ нс}$ для этих линий. Суммарное временное разрешение в результате составляет $\sim 6 \text{ нс}$ для линий [H]- и $\sim 10 \text{ нс}$ для [He]-подобных ионов алюминия. При резких изменениях интенсивности линий временное разрешение уже не определяется шириной «щели» и становится более коротким.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С АЛЮМИНИЕВЫМИ ПРОВОЛОЧНЫМИ СБОРКАМИ. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Юстировка всей регистрирующей системы происходила следующим образом. В предварительных экспериментах на месте расчётного положения спектра перед световодом в вакууме устанавливалась рентгеновская плёнка в специальных направляющих, позволяющих после проявления точно восстановить её положение, а, следовательно, и положение спектра на торцах световодов. Камера переводилась в кадровый статический режим с минимальным уровнем усиления. Полученный на плёнке спектр просвечивался фонариком, и пара прямоугольных световодов перемещалась по противоположному торцу круглого световода до точного наведения на конкретные линии. Контроль осуществлялся по изображению спектра на ноутбуке.

В экспериментах по имплозии многопроволочныхборок на сильноточном генераторе С-300 были получены развёртки двух отрезков спектра вблизи резонансной линии водородоподобного иона алюминия, а также резонансной и интеркомбинационной линий гелиеподобного иона алюминия. Развёртки спектров предварительно обрабатывались программой Klen 5mb, поставляемой вместе с камерой, которая содержит калибровочные библиотеки для компенсации нелинейности развёртки, неравномерности чувствительности по экрану и т.д. С целью уменьшения влияния шумов телевизионной камеры на полу-

ченные изображения использовалось вычитание сигнала шумов, позволяющее уменьшить его регулярную составляющую — фон.

На рис. 5 представлены результаты эксперимента 2008_06_5 № 1. Мягкое рентгеновское излучение (МРИ) в этом опыте росло и спадало плавно, что связано, по-видимому, с некомпактным сжатием плазмы. Его максимум совпал с максимальным сжатием на щелевой развёртке в свете и с самой сжатой фазой плазмы, сфотографированной в МРИ с временем экспозиции 5 нс. Интенсивность K -излучения горячих ионов алюминия демонстрирует наибольшую температуру (наибольшее соотношение интенсивностей линий $[H]$ - и $[He]$ -подобных ионов) плазмы за ~ 7 нс до максимума МРИ. Наибольшая интенсивность в излучении $[H]$ - и $[He]$ -подобных ионов алюминия достигается через 10 нс после максимума МРИ, что отмечено маленьким всплеском и на осциллограммах детекторов AXUV5. Наличие большого количества экстре-

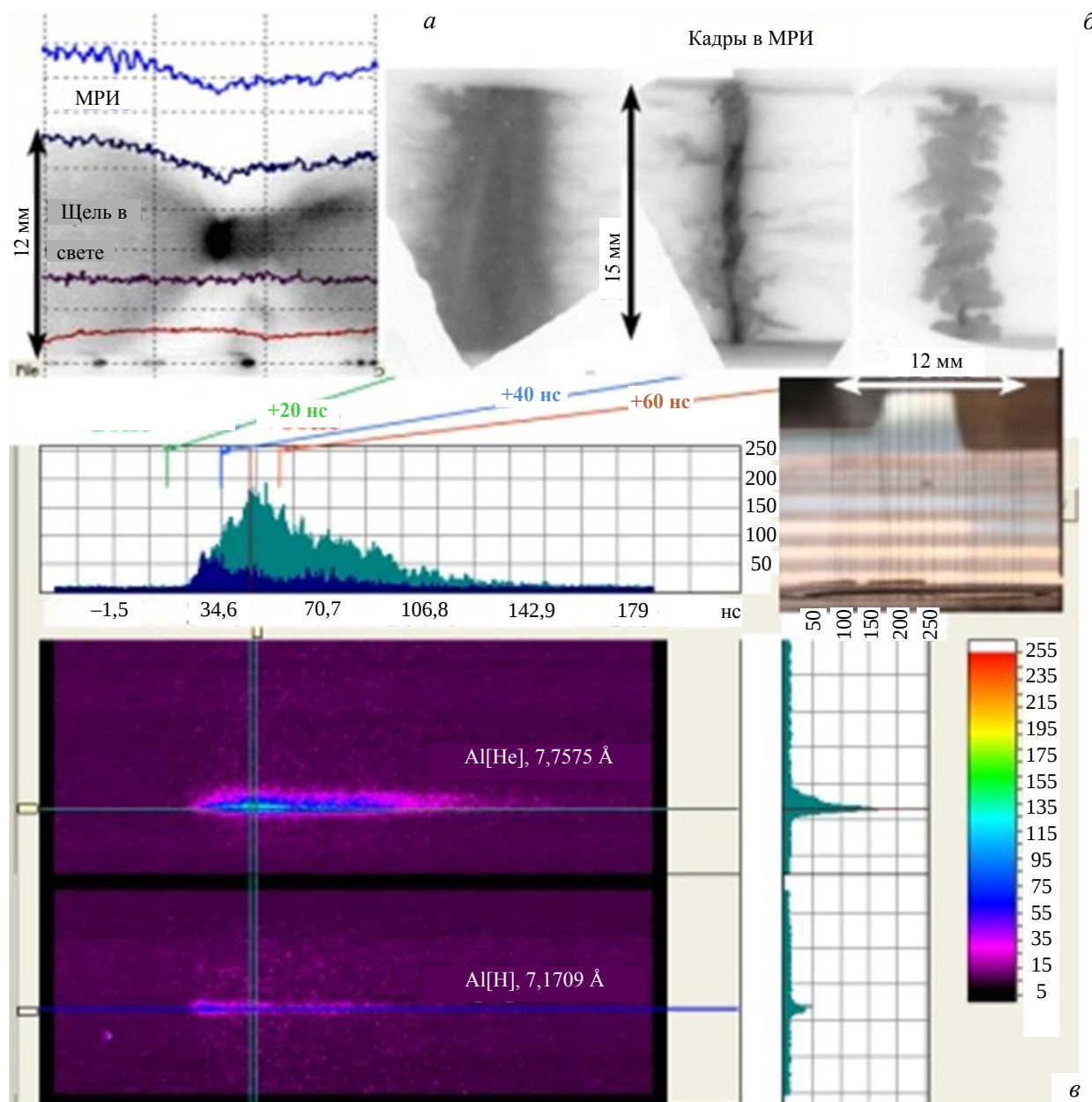


Рис 5. Результаты эксперимента 2008_06_5 № 1: *a* — осциллограммы рентгеновского излучения на фоне щелевой развёртки в свете; *б* — кадры изображения в мягком рентгеновском излучении с временем экспозиции 5 нс (вертикальными черточками показаны моменты времени регистрации кадров); *в* — синхронизованная с осциллограммами временная развёртка элементов спектра. Интенсивность линий выражена в условных цветах. Время на развёртке (слева направо) указано от максимума тока генератора. Слева от развёртки — шкала интенсивностей в условных цветах. Сверху от развёртки — профили временного хода интенсивности линий Res AlXIII $1s-2p$ и Res AlXII $1s^2-1s2p$. Справа — профиль интенсивностей линий в момент максимума излучения Res AlXII. В правом верхнем углу — фотография нагрузки

мумов в интенсивности спектральных линий говорит о неодновременности сжатия плазмы вдоль оси нагрузки. Эту неодновременность видно и на щелевой развёртке в видимом свете. Видна корреляция мощностных характеристик широкого спектра МРИ, измеряемого AXUV5, и K -спектра высокозарядных ионов.

На рис. 6 представлена щелевая развёртка и временной ход интенсивностей резонансной водородоподобной линии $1s-2p$ (а), резонансной (б, зелёная) и интеркомбинационной (б, синяя) линий $1s^2-1s2p$ гелиеподобного иона алюминия в эксперименте 2008_06_07 № 2. Вблизи резонансной линии $[H]$ -подобных ионов алюминия на спектре с временным разрешением не видны самые яркие её спутники. Причина этого в том, что область спектра с этими линиями не попадала на световод (см. рис. 2). Справа — спектр в момент максимума излучения гелиеподобного иона, слева — цветовое обозначение интенсивности излучения на развёртке. Время отсчитывается от максимума электрического тока генератора.

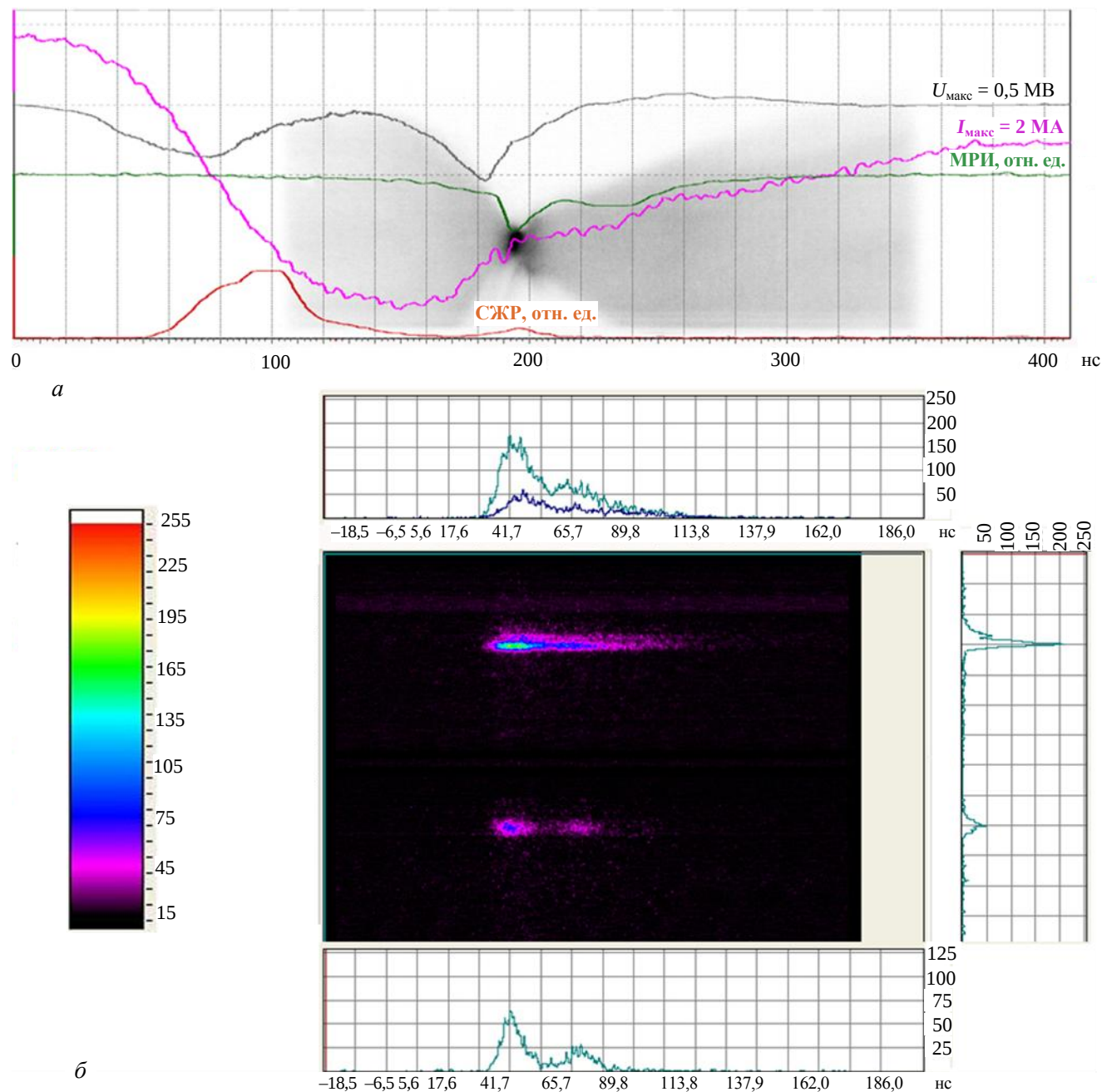


Рис.6. Эксперимент 2008_06_07 № 2. Щелевая развёртка (а) и временной ход интенсивностей резонансной водородоподобной линии $1s-2p$ (б), резонансной (а, зелёная) и интеркомбинационной (а, синяя) линий $1s^2-1s2p$ гелиеподобного иона алюминия. Справа — спектр в момент максимума излучения гелиеподобного иона, слева — цветовое обозначение интенсивности излучения на развёртке. Время на развёртке отсчитывается от максимума электрического тока генератора. На осциллограммах в верхней части рисунка — ход тока, напряжения, мягкого (МРИ) и сверхжесткого (СЖР) рентгеновского излучения

В таблице представлено соотношение интенсивностей резонансных линий гелие- и водородоподобного ионов ($1s-2p$) алюминия для пяти временных интервалов длительностью 6 нс, соответствующих указанным моментам времени относительно максимума электрического тока генератора в эксперименте 2008_06_07 № 2. Это отношение успевает существенно измениться за несколько наносекунд, что может происходить только при достаточно большой плотности плазмы $N_e \sim 10^{20} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Чётко просматривается максимум в соотношении интенсивностей линий на 67 нс, что явно указывает на падение температуры плазмы в этот момент. Сама интенсивность излучения также падает, что естественно связать с некоторым уменьшением плотности плазмы.

Эксперимент 2008_06_07 № 2. Соотношение интенсивностей резонансных линий гелие- и водородоподобного ионов алюминия (время отсчитывается от максимума тока)

Порядковый № временного интервала	T , нс	$\text{Res}[\text{He}]1s^2-1s2p/\text{Res}[\text{H}]1s-2p$	T_e , эВ	N_e , 10^{20} см^{-3}
1	48	2,17	420	15,4
2	54	2,33	447	7,9
3	60	3,60	391	6,0
4	67	4,74	306	23
5	73	3,23	418	9,44

Если принять во внимание (рис. 7) многоточечную структуру, небольшие размеры горячих точек излучающей плазмы и их динамику (а значит, и короткое время излучения) в этом эксперименте, то наиболее вероятно, что излучение в различные моменты времени соответствует разным областям плазмы.

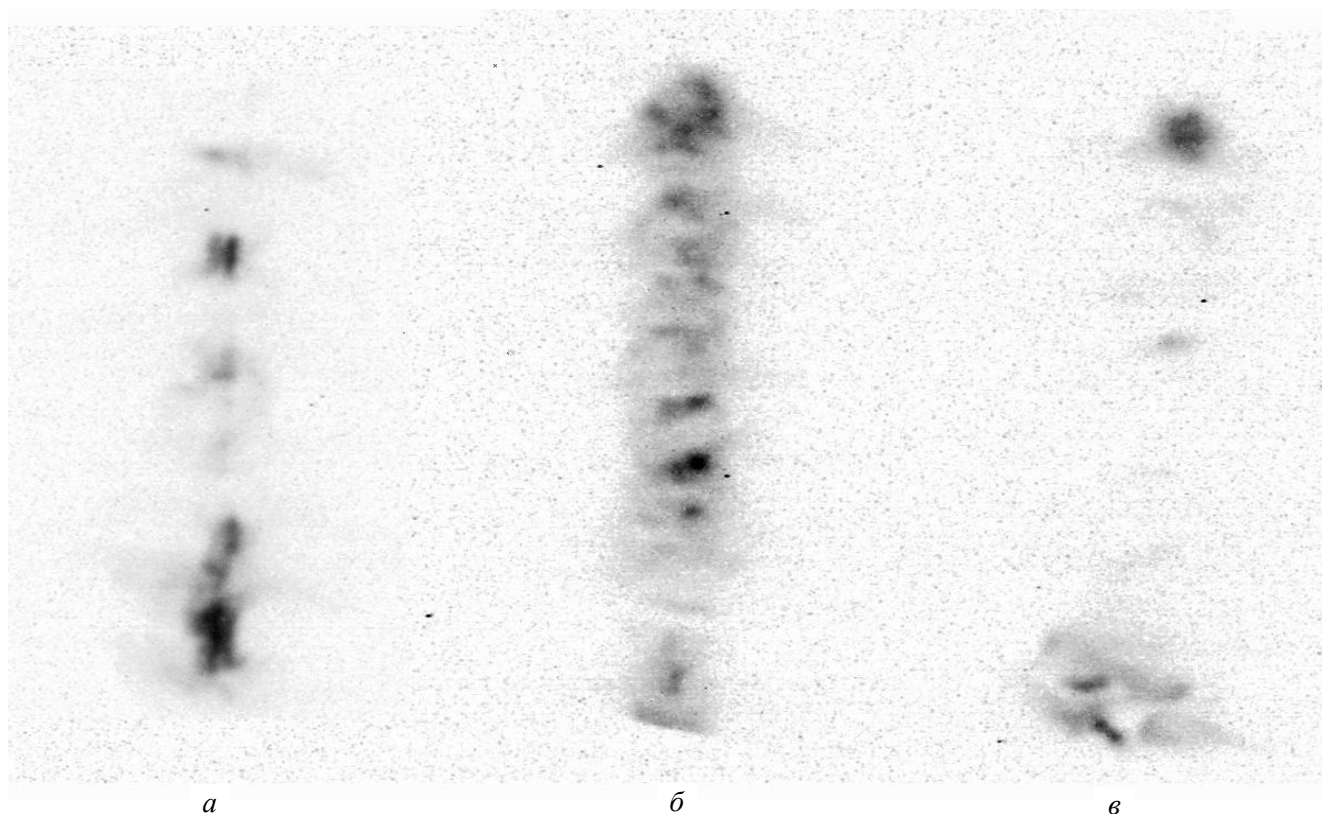


Рис. 7. Кадры изображения плазмы в МРИ в моменты 30 (а), 40 (б) и 60 (в) нс от максимума тока генератора

Углублённый анализ полученных спектральных результатов требует учёта особенностей каждого эксперимента с использованием данных всего набора диагностик и, кроме того, привлечения специального спектрального кода в ударно-излучательной модели для нестационарной плазмы, учитывающего реабсорбцию излучения в линиях [6].

Работа поддержана грантом РФФИ № 08-02-01102а и грантом № 177 Фонда «Научный потенциал» (Human Capital Foundation).



Сергей Станиславович Ананьев, н.с.



Сергей Александрович Данько, нач. лаборатории, к.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности



Юрий Григорьевич Калинин, нач. отдела, д.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности
kalinin@dap.kiae.ru

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Chernenko A.S., Gorbulin Yu.M., Kalinin Yu.G. et al.** — In: Proc. 11th Intern. Conf. on High-Power Particle Beams. Prague, 1996, p. 154.
2. **Attelan-Langlet S., Etlicher B., Fedulov M.V., Michensky V.O., Volkov G.S., Zaitsev V.I.** — In: Proc. 12th Intern. Conf. on High-Power Particle Beams. Haifa, 1998, vol. 1, p. 49—52.
3. **Safronova et al.** Spectroscopy and implosion dynamics of low wire number nested arrays on the 1 MA COBRA generator. — *Physics of Plasmas*, 2008, vol. 15, Issue 3, p. 033302—033302-14.
4. **Скобелев И.Ю., Фаенов А.Я., Брюнеткин Б.А., Дякин В.А., Пикуз Т.А., Пикуз С.А., Шелковенко Т.А., Романова В.М., Мингалеев А.Р.** Исследование радиационных свойств плазменных объектов методами рентгеновской изображающей спектроскопии. — *ЖЭТФ*, 1995, т. 108, № 4, с. 1263—1308.
5. <http://www.bifocompany.com/p-cam-k008.php>.
6. **Держиев В.И., Жидков А.Г., Яковленко С.И.** Излучение ионов в неравновесной плотной плазме. — М.: Энергоатомиздат, 1986.

Статья поступила в редакцию 6 апреля 2009 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2009, вып. 2, с. 43—51.