

## ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В МЕТАЛЛОКАНАЛЬНЫХ И СТАНДАРТНЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЯХ

© 2016 г. В. А. Морозов, Н. В. Морозова

Объединенный институт ядерных исследований  
Россия, 141980, Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6

E-mail: vmorozov@nusun.jinr.ru

Поступила в редакцию 09.04.2015 г.

Изучено влияние разности потенциалов на электродах фокусирующих камер фотоэлектронных умножителей (ф.э.у.) XR2020, ФЭУ-85, ФЭУ-87, ФЭУ-93 на интенсивность послеимпульсов, возникающих вследствие газоразрядных процессов. Исследованы также временные распределения послеимпульсов в металлоканальных ф.э.у. H6780 и R7600U-200.

DOI: 10.7868/S0032816216020105

Развитие газоразрядных процессов в фотоэлектронных умножителях (ф.э.у.) связано с прохождением электронных потоков, возникающих при регистрации фотонного излучения. Проходящая при этом ионизация остаточных газов в ф.э.у. приводит к дрейфу к фотокатоду или к динодам положительно заряженных ионов с последующей вторичной ион-электронной эмиссией электронов. Возникающие при этом послеимпульсы обладают двумя характерными особенностями. Во-первых, время их появления после прохождения основного сигнала определяется временем дрейфа ионов от места их образования до фотокатода и обычно составляет от наносекунд до десятков микросекунд. Вторая особенность заключается в существовании предела в их амплитудном (зарядовом) распределении независимо от амплитуды выходных импульсов. Этот предел определяется величиной коэффициента

вторичной ион-электронной эмиссии, зависящей от массы и заряда ионов.

Результаты исследования амплитудно-временных характеристик послеимпульсов, обусловленных ионной обратной связью, от амплитуды основного сигнала, а также зависимости скорости счета послеимпульсов от скорости счета основных импульсов ф.э.у. XR2020, ФЭУ-87 и ФЭУ-30 при разных напряжениях на фотоумножителях и разных порогах дискриминатора представлены в работе [1]. В данной работе проведено аналогичное исследование как стандартных ф.э.у. XR2020, ФЭУ-93, ФЭУ-85, ФЭУ-87, так и малогабаритных металлоканальных ф.э.у. H6780 и R7600U-200, которые отличаются высокой квантовой эффективностью. К стандартным типам ф.э.у. мы относим электровакуумные приборы с динодами различной конфигурации: коробчатыми, жалюзийными, тороидальными и т.д.

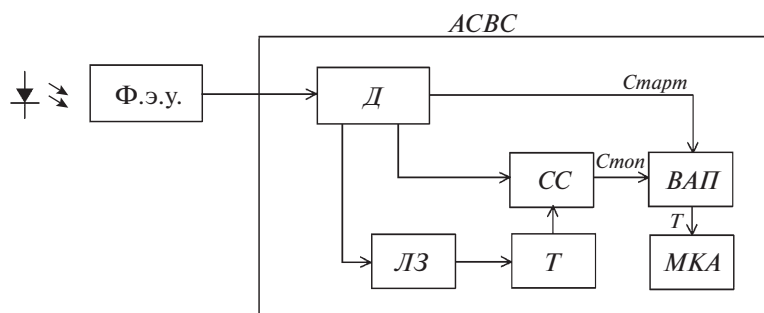
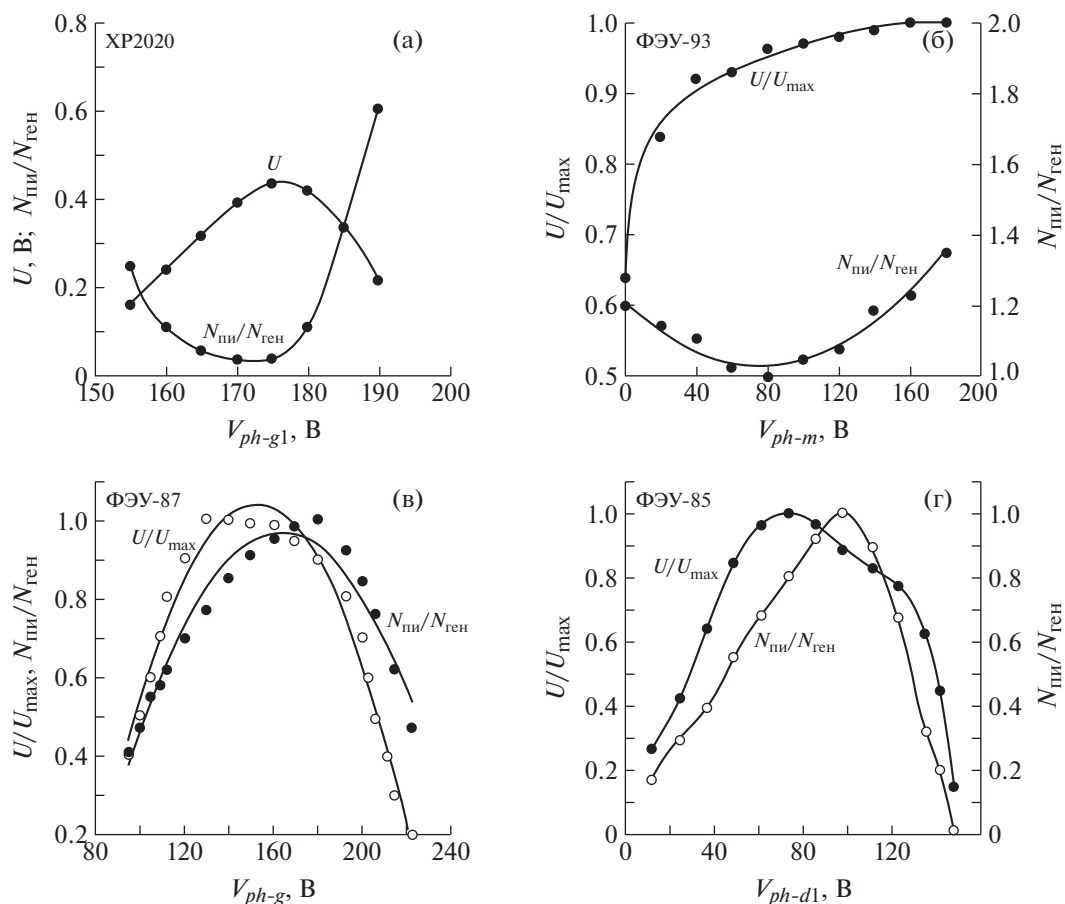


Рис. 1. Блок-схема автокорреляционного однокристалльного сцинтилляционного спектрометра задержанных совпадений. АСВС – автокорреляционный сцинтилляционный временной спектрометр, Д – дискриминатор, Т – триггер, ЛЗ – линия задержки, ВАП – времяамплитудный преобразователь, СС – схема совпадений, МКА – многоканальный анализатор.



**Рис. 2.** Оптимизация фокусирующих потенциалов фотоумножителей разных типов: **а** – напряжение ф.э.у.  $V = 1800$  В, порог дискриминатора  $V_d = 0.025$  В; **б** –  $V = 1600$  В,  $V_d = 0.0125$  В; **в** –  $V = 1800$  В,  $V_d = 0.05$  В; **г** –  $V = 1000$  В,  $V_d = 0.05$  В.

Фотоумножители H6780 и R7600U-200 относятся к компактным металлоканальным фотодетекторам, предназначенным для регистрации фотонного излучения в диапазоне 300–600 нм. Исследования были предприняты с целью оценки возможности использования таких ф.э.у. в поиске изомерных состояний в нано- и микросекундной области при изучении радиоактивного распада или в ядерных реакциях.

Основная цель данной работы заключалась в оптимизации разности потенциалов на электродах в фокусирующей камере ф.э.у. для получения максимальной амплитуды выходного сигнала и ограничения, насколько возможно, скорости счета послеимпульсов, обусловленных ионной обратной связью. Для ф.э.у. H6780 и R7600U-200 изменение разности потенциалов в промежутке фотокатод – первый диод не представлялось возможным, поэтому были проведены исследования только временных характеристик послеимпульсов этих ф.э.у.

Измерения проводились на автокорреляционном сцинтилляционном временном спектромет-

ре, блок-схема которого приведена на рис. 1. Длительность выходных импульсов с дискриминатора  $D$  составляла 10 нс, а мертвое время дискриминатора равно 20 нс (ORTEC CFD-572). Длительность импульса с триггера  $T$  равна длительности исследуемого диапазона. Линия задержки  $LЗ$  предназначена для исключения самосовпадений. Использован времямплитудный преобразователь ВАП ORTEC ТРНС-467. Схема совпадений  $СС$  обеспечивает выделение послеимпульсов после регистрации основного импульса. В качестве источника света служит светодиод, излучающий в красной области спектра импульсы длительностью 10 нс. Некоторые характеристики ф.э.у. H6780, R7600U-200, XR2020, ФЭУ-87 и ФЭУ-93 приведены в таблице.

Подбор потенциалов в фокусирующей камере позволяет для ф.э.у. некоторых типов найти режим, который обеспечивает максимальную амплитуду основного сигнала при минимальной скорости счета послеимпульсов. Проведенные ранее подобные исследования XR2020 и ФЭУ-130 показали [2], что наиболее ярким примером ф.э.у., позволяющего существенно понизить ин-

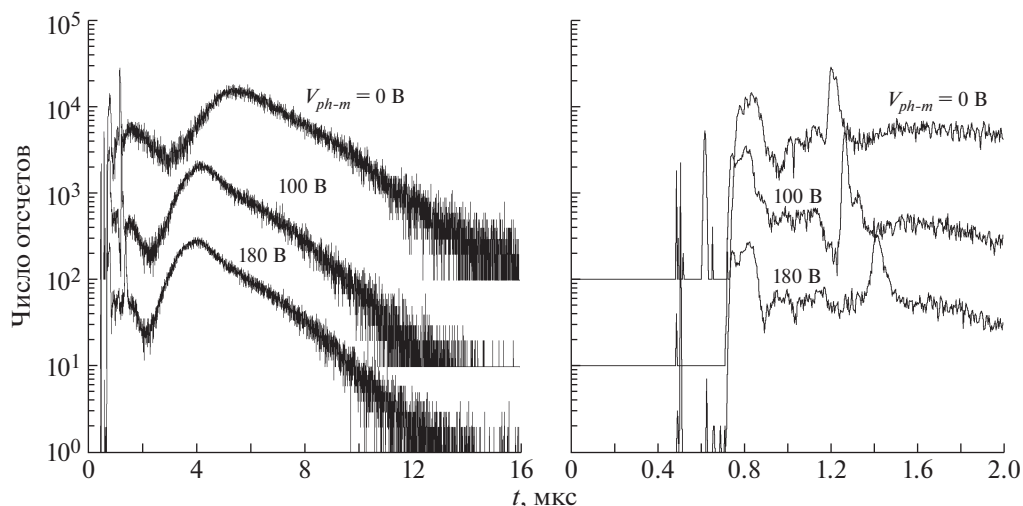


Рис. 3. Временные распределения послеимпульсов в ФЭУ-93 для разных значений потенциала  $V_{ph-m}$  в разном интервале времен.  $V = 1600$  В,  $U = 1$  В,  $V_d/U = 0.0125$ .

тенсивность послеимпульсов путем подбора соответствующих потенциалов, является ХР2020 (рис. 2). Очевидно, что это происходит вследствие реализации разных условий фокусировки для положительно заряженных ионов и для электронов. На рис. 2 приведены также аналогичные характеристики для ФЭУ-85, ФЭУ-87 и ФЭУ-93. В процессе исследований изменяли в фокусирующих камерах разности потенциалов  $V_{ph-m}$ ,  $V_{ph-g}$  или  $V_{ph-d1}$  для ф.э.у. разных типов. Здесь  $V_{ph-m}$  есть разность потенциалов в промежутке фотокаатод-модулятор,  $V_{ph-g}$  — разность потенциалов фотокаатод — управляющая сетка,  $V_{ph-d1}$  — разность потенциалов фотокаатод — первый диод. Следует отметить, что для распределений, представленных на рис. 2, проводилась нормировка выходных импульсов  $U$  к  $U_{max}$ , где  $U_{max}$  — максимальное значение амплитуды выходного сигнала, и интенсивностей послеимпульсов  $N_{пи}$  к интенсивности импульсов генератора.

Сравнение представленных на рис. 2 характеристик позволяет сделать вывод, что только в ФЭУ-93 можно понизить интенсивность регистрируемых послеимпульсов, в отличие от малогабаритных фотоумножителей ФЭУ-85 и ФЭУ-87 с диаметром фотокаатода 25 мм (у ХР2020 и ФЭУ-93 диаметр фотокаатода равен 40 мм при большей длине фокусирующей камеры). Очевидно, что для ФЭУ-85 и ФЭУ-87 не реализуются разные условия фокусировки для электронов и ионов. Поэтому для этих ф.э.у. выбор фокусирующих потенциалов требует принятия компромиссного решения. Тем не менее, следует заметить, что даже в этом случае увеличение порога дискриминатора позволяет исключить регистрацию послеимпульсов ионной обратной связи, если учесть существование предела амплитуд таких импульсов [2]. Однако при этом эффективность регистрации задержанных совпадений будет существенно снижена.

#### Сравнительные характеристики фотоумножителей

Тип ф.э.у.	Напряжение питания $V_{фэу}$ , В	Квантовая эффективность $QE$ , %	Длина волны $\lambda^{**}$ , нм	Размеры фотокаатода, мм
ХР2020	2200	26	401	Ø44
ФЭУ-85	900	31	410	Ø25
ФЭУ-87	2200	31	410	Ø25
ФЭУ-93	2100	29	430	Ø40
R7600U-200	900	43	350	18×18
H6780	15*	15	420	Ø8

\* Напряжение питания для внутреннего высоковольтного блока.

\*\* Длина волны излучения при определении квантовой эффективности  $QE$ .

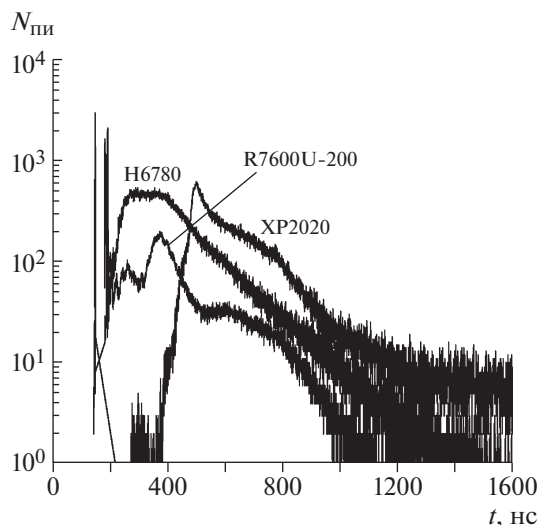


Рис. 4. Временные распределения послеимпульсов ф.э.у. XP2020, H6780 и R7600U-200. Амплитуда выходного импульса  $U = 0.5$  В, порог регистрации  $V_d = 0.06$  В.

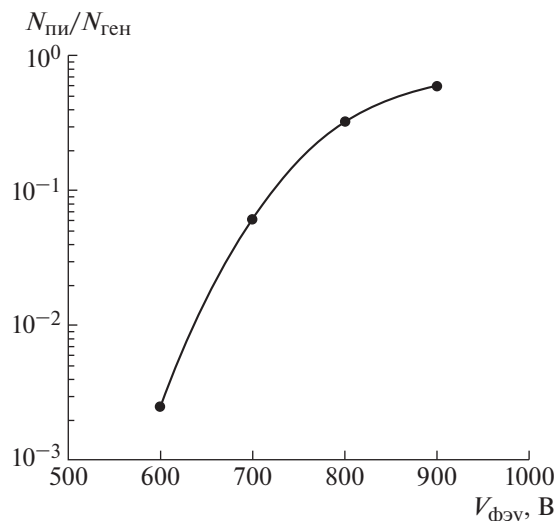


Рис. 5. Зависимость интенсивности послеимпульсов от напряжения для ф.э.у. R7600U-200. Амплитуда выходного импульса  $U = 0.5$  В, порог регистрации  $V_d = 0.06$  В.

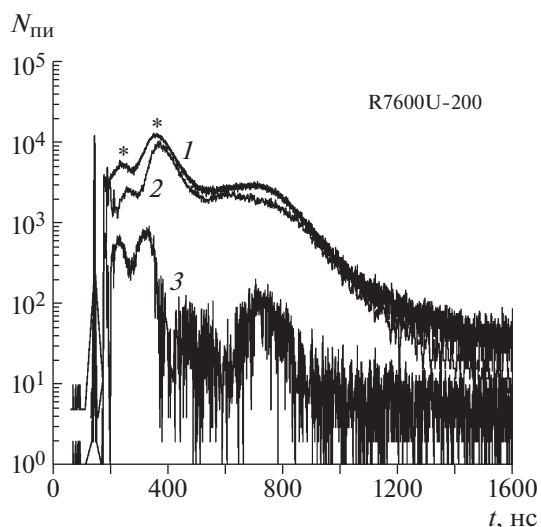


Рис. 6. Спектры временных распределений послеимпульсов для ф.э.у. R7600U-200 при разных значениях напряжения на нем: 1 –  $V_{фэу} = 900$  В, 2 –  $V_{фэу} = 600$  В; 3 – спектр разности временных распределений 1 и 2. Звездочками отмечены положения двух первых максимумов.

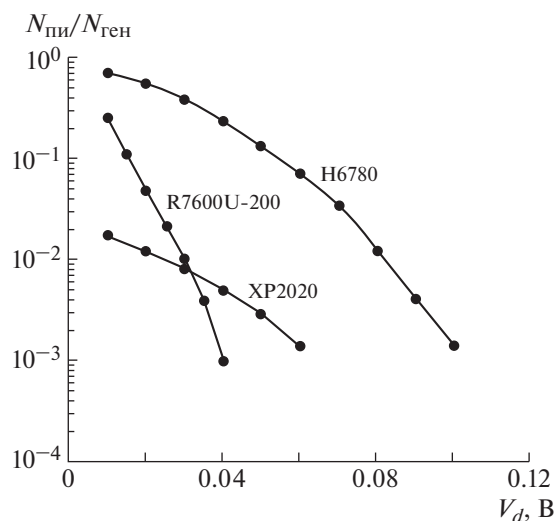
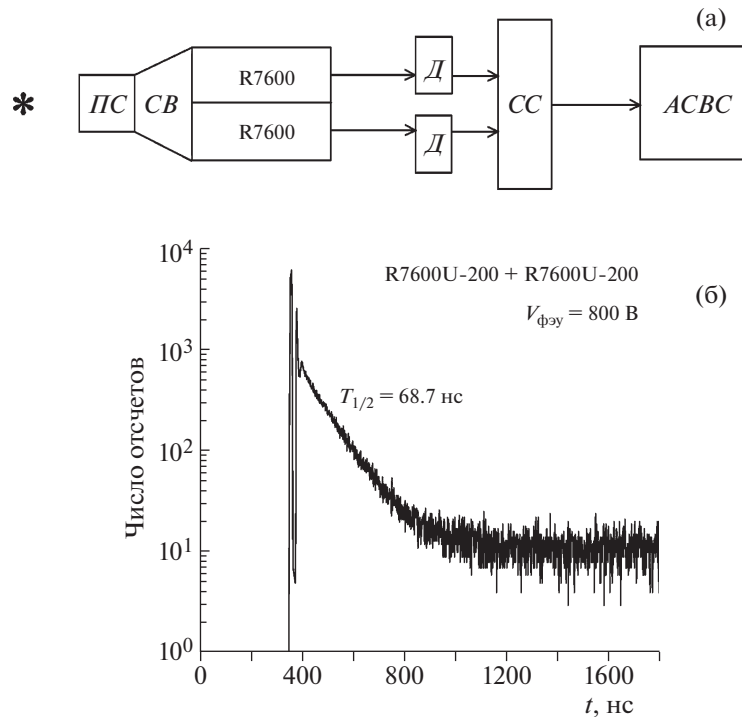


Рис. 7. Интенсивности послеимпульсов в зависимости от порога регистрации  $V_d$  для ф.э.у. H6780, R7600U-200 и XP2020.  $U = 0.5$  В.

Особенно интересно рассмотреть временное распределение послеимпульсов ФЭУ-93 (рис. 3). Измерения проводились при амплитуде выходного сигнала  $U = 1$  В при пороге дискриминатора  $V_d = 12.5$  мВ. Здесь мы наблюдаем разное влияние межэлектродных потенциалов на дрейф ионов в фокусирующей камере: при повышении потенциала  $V_{ph-m}$  ионы в диапазоне времен от 3 до 12 мкс ускоряются (рис. 3, слева), а в диапазоне

1.2–1.6 мкс – замедляются (рис. 3, справа). Этот эффект свидетельствует о дрейфе ионов из разных частей фокусирующей камеры ф.э.у.

На рис. 4 приведены ненормированные спектры временных распределений послеимпульсов для металлоканальных фотоумножителей H6780 и R7600U-200. Для сравнения здесь же приведен также временной спектр послеимпульсов для ф.э.у. классического типа XP2020. Как было показано ранее [1], для XP2020 такое временное распределение характерно при регистрации после-



**Рис. 8. а** – блок-схема спектрометра задержанных совпадений со двоянным фотодетектором: ПС – пластмассовый сцинтиллятор, СВ – световод, Д – дискриминатор, СС – схема совпадений, АСВС – автокорреляционный сцинтилляционный временной спектрометр; **б** – результаты измерения периода полураспада состояния с энергией 59 кэВ в  $^{237}\text{Np}$  при использовании двоянного фотодетектора с ф.э.у. R7600U-200.

импульсов, обусловленных ионной обратной связью. Максимум интенсивности этого распределения для ф.э.у. ХР2020 задержан по отношению к моменту регистрации основного импульса более чем на 200 нс, что обеспечивает возможность точного определения в этом интервале времени жизни изомеров от единиц до нескольких сотен наносекунд. Тогда как в металлоканальных ф.э.у. момент регистрации послеимпульсов начинается почти сразу после регистрации основного импульса, что затрудняет определение времени жизни изомерных состояний в наносекундной области.

Изучение зависимости интенсивности послеимпульсов от напряжения на ф.э.у. R7600U-200 при пороге регистрации  $V_d = 0.06$  В и амплитуде выходного импульса  $U_0 = 0.5$  В (рис. 5) позволило установить, что данный вид распределения также обусловлен ионами обратной связи. Это связано с тем, что разница в положении первых двух максимумов, отмеченных звездочками во временных распределениях при  $V = 600$  В и 900 В, равная  $\sim 100$  нс, существенно превышает время пролета электронов при данной разности потенциалов и соответствует времени дрейфа к фотокатоду ионов обратной связи (рис. 6).

Для ф.э.у. Н6780 это заключение, исходя из вида временного распределения послеимпульсов (см. рис. 4), очевидно, также верно, но отсутствие какого-либо пика во временном спектре задержанных совпадений не позволяет провести аналогичные измерения для этого ф.э.у. по сравнению с R7600U-200.

На рис. 7 представлены зависимости интенсивности послеимпульсов ф.э.у. при различных порогах регистрации излучения. Напряжение на металлоканальных ф.э.у. соответствовало паспортным данным. Анализ этих зависимостей позволяет установить, что при равных интенсивностях послеимпульсов наибольшие предельные амплитуды послеимпульсов наблюдаются у ф.э.у. Н6780, а наименьшие – у R7600U-200, что позволяет при более низком пороге без помех регистрировать низкоэнергетическое излучение.

На рис. 8б представлены результаты измерения периода полураспада состояния с энергией 59 кэВ в  $^{237}\text{Np}$ , возникающего при распаде  $^{241}\text{Am}$ . При этом существенное подавление регистрации послеимпульсов в ф.э.у. R7600U-200 обеспечивалось стандартным методом – путем регистрации совпадений излучения от одного пластмассового сцинтиллятора двумя ф.э.у. (рис. 8а) [3]. Порог

регистрации излучения  $E_d$  в этом случае не превышал  $\sim 10$  кэВ.

Результаты проведенных исследований позволяют констатировать, что при оптимизации разности потенциалов на электродах определенных типов ф.э.у. можно добиться существенного уменьшения интенсивности зарегистрированных послеимпульсов ф.э.у. что особенно важно при регистрации низкоэнергетического излучения на уровне шумов. На примере сравнения результатов подбора разности потенциалов в ф.э.у. ХР2020 и ФЭУ-93, ФЭУ-85, ФЭУ-87 было показано, что решение проблемы минимизации числа регистрируемых послеимпульсов путем регулирования фокусирующих потенциалов в малогабаритных ф.э.у. затруднено. Для решения этой задачи является предпочтительным использование ф.э.у. с большими размерами фокусирующих камер, таких как ХР2020 или ФЭУ-93. Очевидно, что в этих фотоумножителях по мере улучшения фокусировки электронов происходит расфокусировка положительных ионов, что сказывается на соотношении интенсивностей зарегистрированных электронов и ионов. Для малогабаритных фотоумножителей ФЭУ-85 и ФЭУ-87 подобного эффекта изменением разности фокусирующих потенциалов добиться не удается, поэтому наи-

более простым способом подавления регистрации послеимпульсов является использование двухдетекторного варианта спектрометра совпадений с последующим анализом задержанных совпадений, как в случае с ф.э.у. R7600U-200.

Таким образом, при исследовании изомерии атомных ядер в нано- и микросекундном диапазоне в зависимости от энергии излучений изомерного каскада и времени жизни изомерного состояния могут быть использованы ф.э.у. разных типов как в однодетекторных, так и в двухдетекторных спектрометрах совпадений. В тех случаях, когда высокая чувствительность и минимальные габариты детектора играют решающую роль, предпочтительно использовать малогабаритные металлоканальные ф.э.у.

Авторы выражают благодарность В.Б. Бруданину за помощь в проведении данных исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов В.А., Морозова Н.В. // ПТЭ. 1997. № 4. С. 97.
2. Бруданин В.Б., Морозов В.А., Морозова Н.В. // ПТЭ. 2004. № 6. С. 69.
3. Морозов В.А., Морозова Н.В. // ПТЭ. 2003. № 1. С. 37.