

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ СБОРА ДАННЫХ С ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ДЕТЕКТОРОВ НЕЙТРОНОВ

© 2020 г. Е. И. Литвиненко<sup>a,\*</sup>, А. А. Богдзель<sup>a</sup>, В. И. Боднарчук<sup>a</sup>, А. В. Чураков<sup>a,b</sup>, И. В. Гапон<sup>a,c</sup>, В. А. Дроздов<sup>a</sup>, С. А. Куликов<sup>a</sup>, С. М. Мурашкевич<sup>a</sup>, А. В. Нагорный<sup>a,d</sup>

<sup>a</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

<sup>b</sup> Государственный университет “Дубна”, Дубна, Россия

<sup>c</sup> Институт проблем безопасности на ядерных электростанциях НАН Украины, Чернобыль, Украина

<sup>d</sup> Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, Киев, Украина

\*e-mail: litvin@nf.jinr.ru

Поступила в редакцию 27.12.2019 г.

После доработки 16.01.2020 г.

Принята к публикации 20.01.2020 г.

Обсуждаются результаты параллельных измерений с двухкоординатными позиционно-чувствительными <sup>3</sup>He-детекторами с линией задержки, которые установлены на нейтронных спектрометрах РЕФЛЕКС и ГРЭЙНС импульсного реактора ИБР-2, при использовании одновременно трех систем сбора данных: DeLiDAQ-1, DeLiDAQ-2 и системы на базе дигитайзера N6730 производства CAEN.

DOI: 10.31857/S0032816220040072

### ВВЕДЕНИЕ

Поиск оптимального варианта электроники для нейтронных позиционно-чувствительных детекторов (п.ч.д.) со считыванием с линии задержки всегда является непростой задачей [1–5], особенно актуальной для времяпролетных спектрометров, работающих на высокопоточных пучках реактора ИБР-2 [6]. Выбор метода времени пролета (ТОФ) как рабочего режима для спектрометров на реакторе связан с импульсным характером работы ИБР-2 с частотой вспышек 5 Гц. Обзоры результатов многолетней работы по созданию систем сбора данных для п.ч.д. нейтронов представлены в [7, 8]. В данной работе затронуты некоторые проблемные моменты в этих задачах (связанных в первую очередь со спецификой импульсного источника нейтронов [9]). Имеется в виду неоднородная, пульсирующая входная нагрузка от реактора, которая ужесточает требования к системам сбора данных, поскольку возникает необходимость обеспечивать максимальную пропускную способность во время сгустков потока входных сигналов. Так при измерениях прямого пучка на спектрометрах ИБР-2 пиковая нагрузка на детекторе в 20–50 раз превышает нагрузку, усредненную по времени. В этих условиях специально разработанная электроника для двухкоординатных

п.ч.д. DeLiDAQ-1 [10–12], успешно работающая много лет также в других нейтронных центрах, но в режиме без времени пролета, при высоких уровнях нагрузок выявила проблему снижения счета в хвостовой части времяпролетного окна (причем, без снижения интегрального счета). Электроника следующего поколения для двухкоординатных п.ч.д. DeLiDAQ-2 [13] с первых применений показала отличную производительность при высоких нагрузках, однако затем у этой системы обнаружилась проблема деградации пространственного разрешения при низкой нагрузке. Третий рассматриваемый вариант электроники – это дигитайзер N6730 производства CAEN [14], который мы начали тестировать недавно [15] для изучения возможностей использования его с детекторами собственного производства [16, 17] на пучках реактора ИБР-2.

### МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ

Для определения границ применимости систем сбора данных во времяпролетном режиме работы и сравнения их с альтернативным вариантом была проведена серия параллельных измерений с тремя системами: DeLiDAQ-1, DeLiDAQ-2 и системой на базе дигитайзера N6730 с прошивкой DPP-PSD от CAEN. При этом использова-

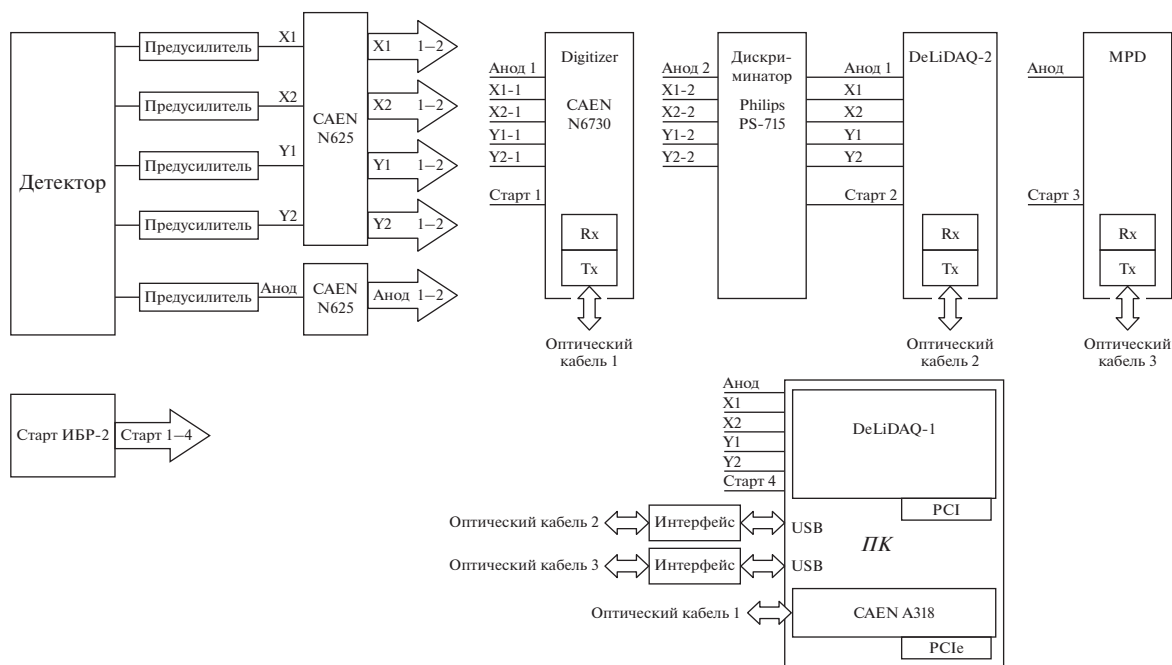


Рис. 1. Принципиальная схема параллельных измерений. ПК – персональный компьютер.

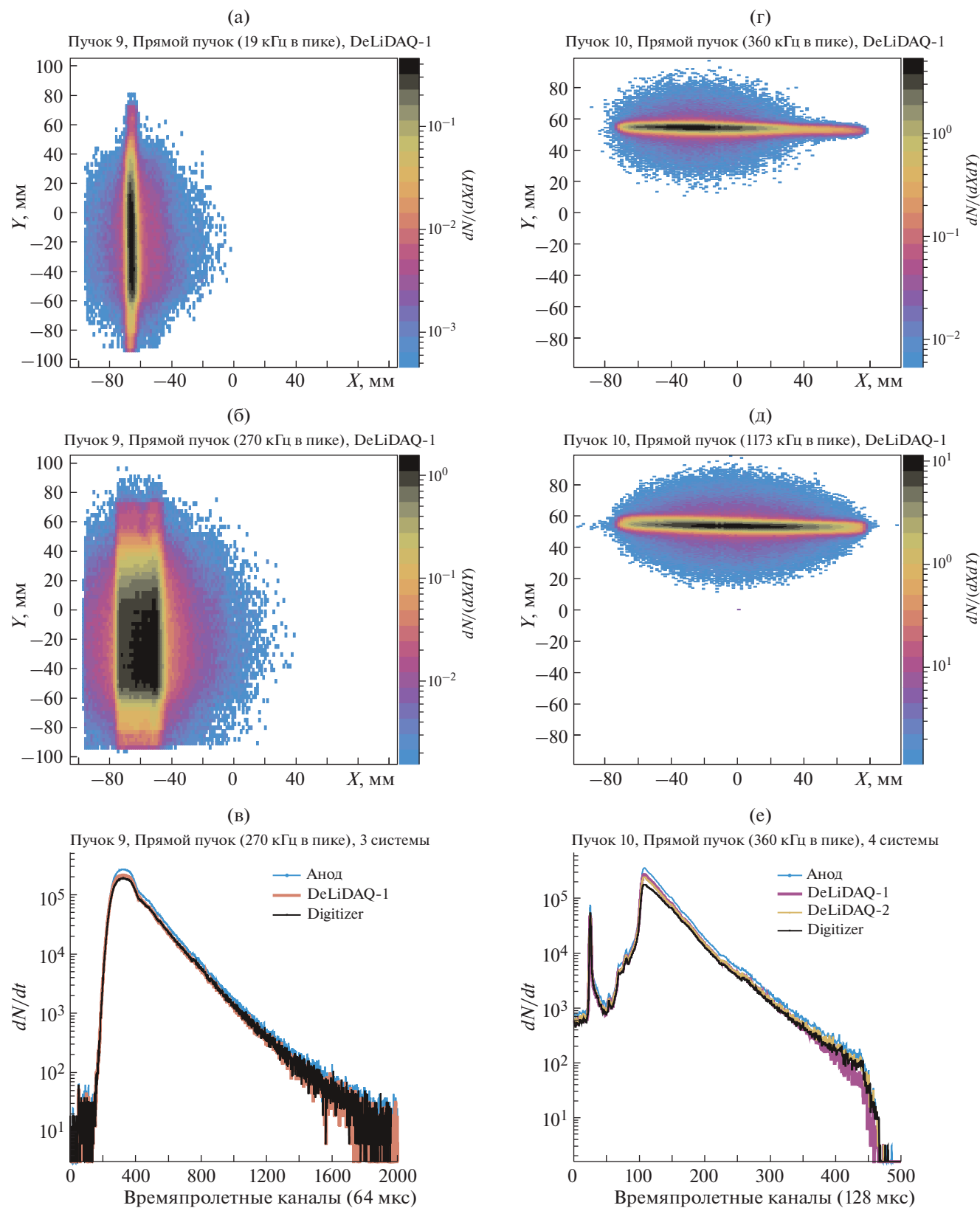
лись двухкоординатные <sup>3</sup>He-п.ч.д. 200 × 200 мм [17] на установках РЕФЛЕКС (пучок 9) и ГРЭЙНС (пучок 10) [18] реактора ИБР-2. Все данные были получены в “рабочих” конфигурациях этих установок. Позиционные сигналы от детектора (с анода и катодов) после усиления поступали на вход блока N625 от CAEN для разветвления на две группы сигналов (рис. 1). Одна из этих групп поступала напрямую на дигитайзер N6730, другая – сначала на дискриминатор постоянной фракции (CFD Philips PS-715), а после него все катодные сигналы распределялись на две группы (для DeLiDAQ-1 и DeLiDAQ-2). Анодный сигнал распараллеливался на 3 выхода, поскольку помимо DeLiDAQ-1 и DeLiDAQ-2 он дополнительно регистрировался четвертой системой сбора данных MPD [19, 20], изначально предназначенной для работы с точечными детекторами. Все три систе-

мы для п.ч.д. могут регистрировать или сырые (необработанные) данные от детектора (дигитайзер), или сырые события, построенные из сырых данных от детектора посредством сортировки (DeLiDAQ-1 и DeLiDAQ-2), в режиме списка. Режим списка – это режим накопления на диск компьютера необработанных данных от детектора или событий напрямую без обработки. Кроме того, системы DeLiDAQ-1 и DeLiDAQ-2 имеют режимы работы с регистрацией отфильтрованных событий – и в режиме списка, и в режиме накопления гистограмм на аппаратном уровне (FPGA). Таблица 1 содержит описание рабочих режимов трех систем.

В 2017 году была проведена серия параллельных измерений для двух систем (DeLiDAQ-1 и DeLiDAQ-2) в режиме с накоплением гистограмм на аппаратном уровне в широком диапазоне

Таблица 1. Измерительные режимы систем сбора данных

Режим	Система сбора данных		
	DeLiDAQ-1	DeLiDAQ-2	Digitizer
Гистограммы вычисляются на аппаратном уровне (сортировку сырых данных и фильтрацию событий также выполняет FPGA)	+	+ (режим до модернизации)	–
Гистограммы – программно, сортировка и фильтрация – FPGA	+ (>100 Гц)	+ (режим до модернизации)	–
Гистограммы и фильтрация – программно, сортировка – FPGA	+ (>100 Гц)	+ (режим после модернизации)	–
Гистограммы, сортировка и фильтрация – на программном уровне	–	–	+



**Рис. 2.** Сканирование прямых пучков с последовательно нарастающей на каждом шаге входной нагрузкой: а, б, г, д – двухкоординатные спектры за одну вспышку реактора (приведены две крайние точки сканов, данные с DeLiDAQ-1), в, е – времяпролетные спектры (для трех п.ч.д.-систем + анод).

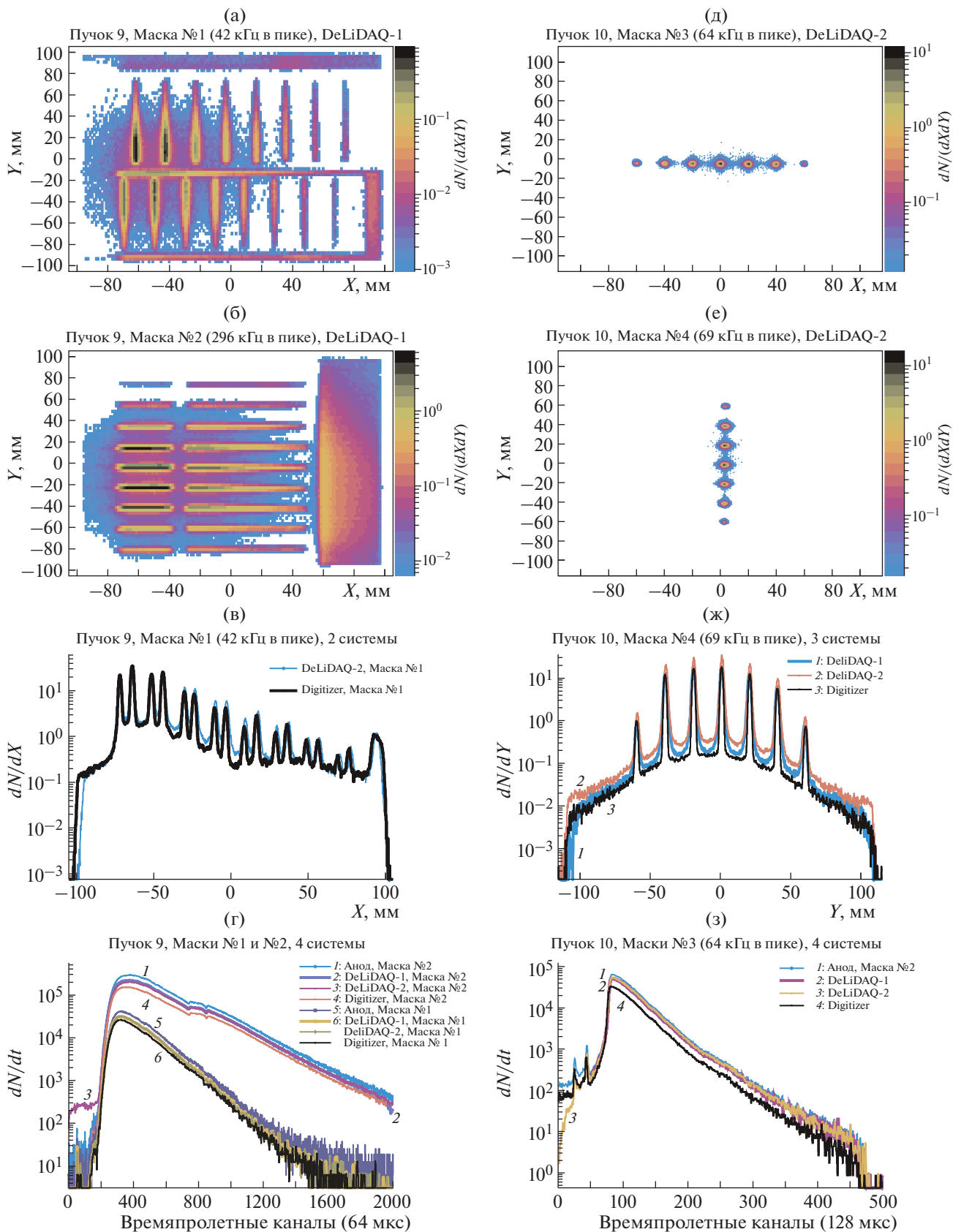
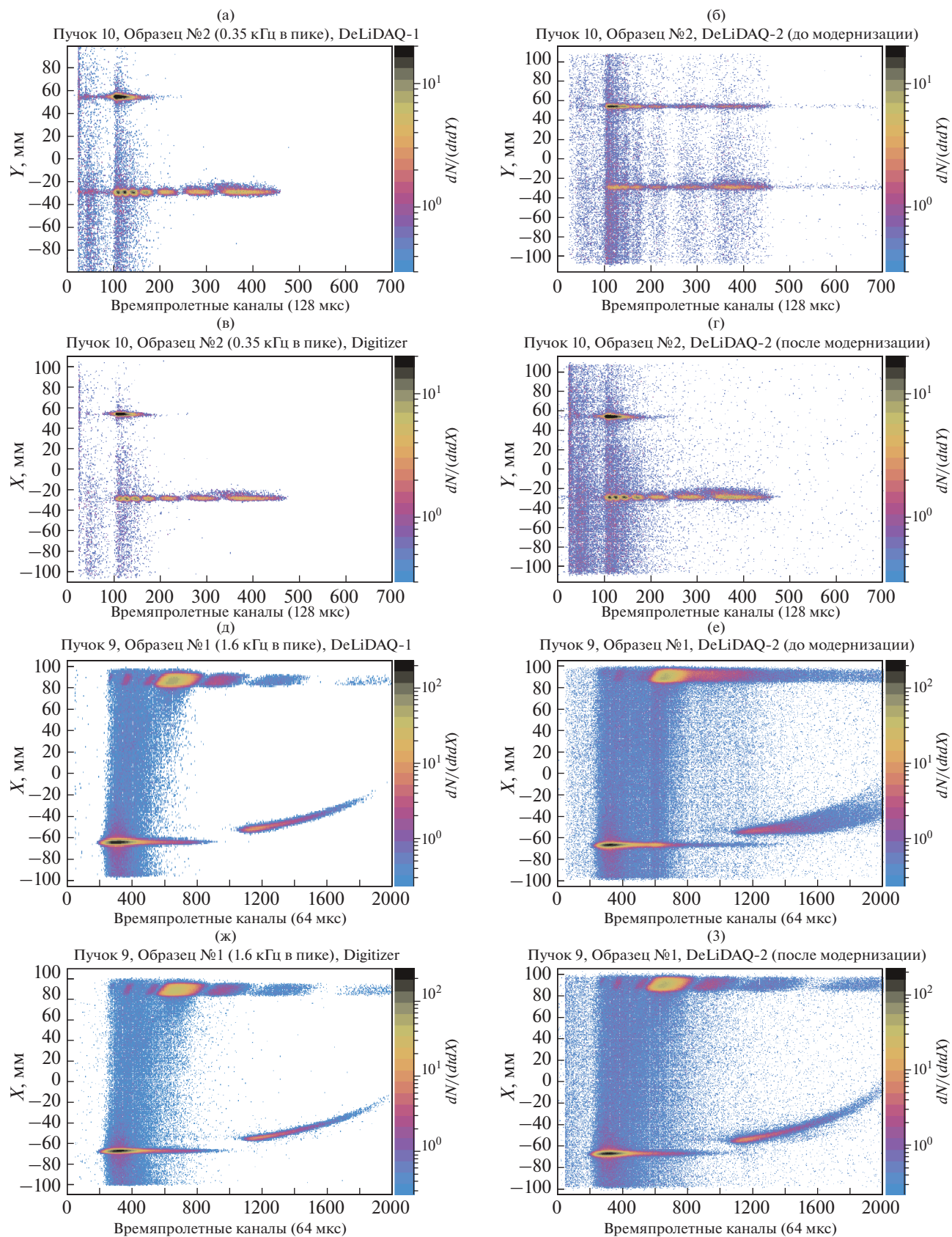


Рис. 3. Калибровочные измерения с щелевыми кадмиевыми масками: а, б, д, е – двухкоординатные спектры за одну вспышку реактора для DeLiDAQ-1 и DeLiDAQ-2), в, ж – однокоординатные спектры за одну вспышку реактора, г, з – времяпролетные спектры (для трех п.ч.д.-систем + анод).



**Рис. 4.** Координатно-времяпролетные спектры при отражении пучка нейтронов от пленочных образцов: **а–г** – измеренные на 10-м пучке, **д–ж** – измеренные на 9-м пучке соответственно системами DeLiDAQ-1, DeLiDAQ-2 до модернизации (на **б** и **е** заметны искажения), дигитайзер и DeLiDAQ-2 после модернизации.

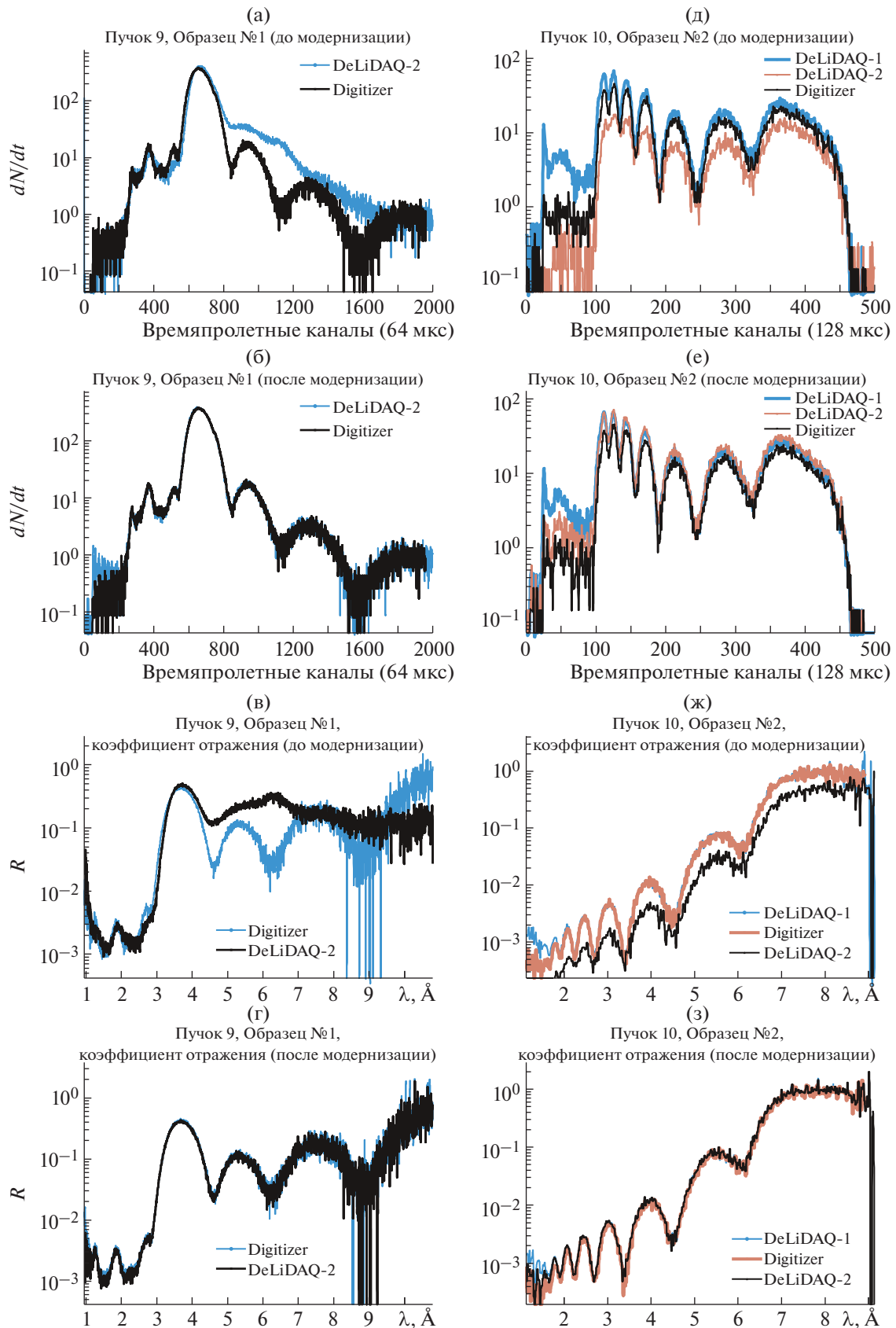
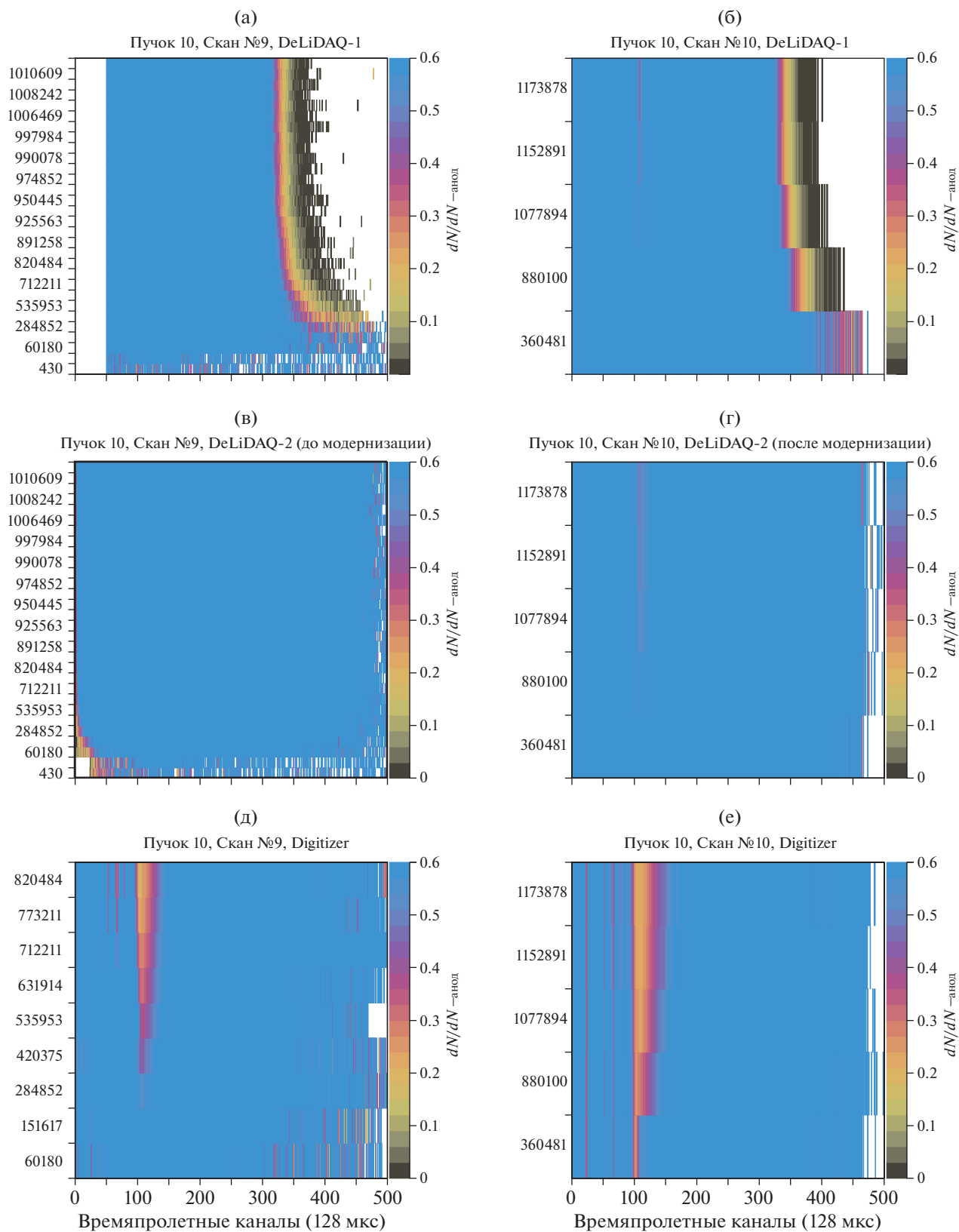


Рис. 5. Времяпролетные спектры (а, б, д, е) и коэффициенты отражения (в, г, ж, з) в зависимости от длины волны при отражении пучка нейтронов от пленочных образцов: а-г – полученные на 9-м пучке, д-з – на 10-м пучке.



**Рис. 6.** Отношение измеренного времяпролетного спектра к анодному спектру, по оси ординат указаны максимальные скорости входного потока (оцениваемые по пику анодного спектра), по оси абсцисс – времяпролетные каналы (ширина канала 128 мкс).

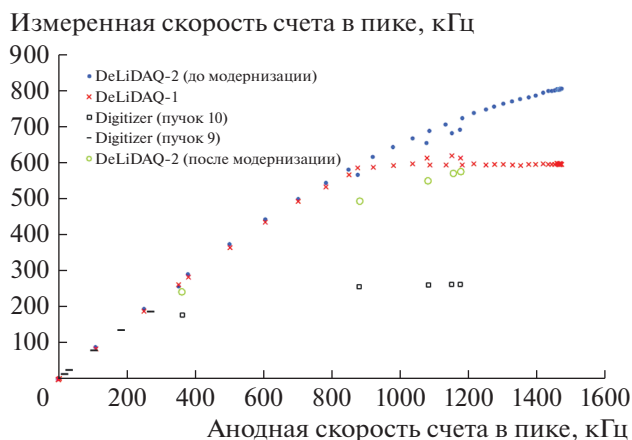


Рис. 7. Измеренная скорость счета (в пике) в зависимости от анодной скорости счета в пике для трех систем сбора данных с п.ч.д.

входных нагрузок. Для реализации длительных измерений в режиме списка необходимо было провести модернизацию прошивки электроники DeLiDAQ-2, которая была выполнена в 2018 году. Для сравнительного анализа были выполнены в режиме TOF параллельные измерения трех типов. Первый тип — сканирование прямого пучка с последовательно нарастающей на каждом шаге входной нагрузкой, регулируемой коллиматорами (варьировалась ширина щели коллиматора) и (на 10-м пучке) отклоняющим зеркалом (рис. 2). Второй тип — калибровочные измерения с щелевыми кадмиевыми масками (рис. 3). Третий тип — измерения отражения от образцов (рис. 4). На рис. 2—4 показаны измеренные интенсивности счета нейтронов за время одной вспышки импульсного реактора ИБР-2 либо на  $1 \text{ мм}^2$  рабочей зоны детектора, как  $dN/(dXdY)$  на рис. 2а, 2б, 2г, 2д и 3а, 3б, 3д, 3е, либо в 1 с, как  $dN/dt$  на рис. 2в, 2е и 3г, 3з, либо на 1 мм, как  $dN/dX$  и  $dN/dY$  на рис. 3в, 3ж, либо на 1 мм/с, как  $dN/(dtdX)$  и  $dN/(dtdY)$  на рис. 4. В измерениях отражений использовались пленочные образцы, стандартные для спектрометров РЕФЛЕКС и ГРЭЙНС. На 9-м пучке измерялся пленочный образец, выполненный из 16 слоев никеля (8.4 нм) и титана (7 нм) на флюат-стекле ( $100 \times 50 \text{ мм}$ ). На 10-м пучке измерялся образец, выполненный с осаждением меди (50 нм) и титана (5 нм) на кристалле кремния ( $80 \times 50 \text{ мм}$ ). Магнетронное осаждение образцов проводилось в компании Mirrotron Ltd. (Будапешт, Венгрия).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 5а, 5б, 5д, 5е представлены времяпролетные спектры, накопленные в области п.ч.д., в которую попадал пучок нейтронов, отраженный от слоистой структуры образца, соответствующие коэффициенты отражения в зависимости от дли-

ны волны нейтрона показаны на рис. 5в, 5г, 5ж, 5з. Рис. 2в, 2е, 3в, 3г, 3ж, 3з, 4а—4з, 5а—5з позволяют сравнить результаты, измеренные в одних и тех же условиях тремя различными системами. Проведенные параллельные измерения показывают, что при типичных рабочих нагрузках имеется хорошее совпадение результатов всех трех систем. Уровень высоких нагрузок, при которых начинается искажение формы времяпролетных спектров (перегрузка), у каждой системы свой (примеры показаны в работе [21, рис. 3]). Проведенный анализ подтверждает, что качество спектров, измеренных каждой из систем, зависит не столько от средней загрузки во входном потоке, сколько от пиковой входной загрузки, в нашем случае это пиковая интенсивность анодного сигнала в единицу времени за одну вспышку импульсного реактора. Рис. 6 показывает как меняется отношение измеренного времяпролетного спектра к анодному ( $dN/dN_{\text{анод}}$ ) по мере роста входной загрузки и позволяет сравнить характер искажений формы спектра. Счетные характеристики нашей штатной системы для п.ч.д. DeLiDAQ-1 не выявляют аномалий до достижения входных нагрузок, близких к номинальной пропускной способности системы 1 МГц [10]. Однако система DeLiDAQ-1 входит в особенное состояние перегрузки уже при 250 кГц пиковой входной загрузки (см. рис. 6а) и в скором времени будет заменена новой электроникой. Более новая система DeLiDAQ-2 не испытывает перегрузок до 1200 кГц, но имеет на текущий момент следующее ограничение: во времяпролетном режиме она должна использоваться только в измерениях в режиме списка сырых событий, в то время как в режиме без времени пролета она успешно фильтрует события и вычисляет гистограммы на уровне аппаратуры (FPGA). На рис. 4б, 4е, 5а, 5в, 5д, 5ж можно видеть искажения на спектрах и длинноволновых зависимостях коэффициентов отражения, полученных на DeLiDAQ-2 при выполнении фильтрации событий на аппаратном уровне, и отсутствие искажений в аналогичных измерениях при выполнении фильтрации DeLiDAQ-2 на программном уровне (рис. 4г, 4з, 5б, 5г, 5е, 5з). Систему на базе дигитайзера также возможно использовать только для измерений в режиме списка (только не событий, а сырых данных), другие ее ограничения — это более низкие (чем у DeLiDAQ-2) пропускная способность (360 кГц) и эффективность счета (рис. 7), а также более сложная (и более долгая) обработка данных (вследствие того, что это электроника общего назначения). При этом система на базе дигитайзера имеет наилучшее пространственное разрешение (см. рис. 3в и 3ж).



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам данной работы мы выбрали два направления дальнейшего развития: систему DeLiDAQ-2 для высокопоточных измерений и систему на базе дигитайзера для измерений с высокой точностью. Работа также выявила необходимость срочно интегрировать измерения в режиме списка в штатную систему управления экспериментами.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны всем коллегам, которые участвовали в обсуждении этой работы. Особая благодарность коллегам с пучка 8 реактора ИБР-2.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фатеев О.В., Черемухина Г.А., Черненко С.П., Заневский Ю.В., Lauter H., Lauter V.V., Кожевников С.В., Никитенко Ю.В., Петренко А.В. // ПТЭ. 2001. № 2. С. 5.
2. Kampmann R., Marmotti M., Haese-Seiller M., Kudryashov V. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. 2004. V. 529. P. 342. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.05.009>
3. Lombigit L., Hamidon M.N., Khalid M.A., Sulaiman N. // Int. J. Phys. Sci. 2012. V. 7. P. 2012. <https://doi.org/10.5897/ijps12.090>
4. Orban J., Rosta L., Nagy A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 528. P. 012044. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/528/1/012044>
5. Hanu A.R., Prestwich W.V., Byun S.H. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. 2015. V. 780. P. 33. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.01.053>
6. Shvetsov V.N. // Quantum Beam Sci. 2017. V. 1. P. 6. <https://doi.org/10.3390/qubs1010006>
7. Kulikov S.A., Prikhodko V.I. // Phys. Part. Nucl. 2016. V. 47 (4). P. 702. <https://doi.org/10.1134/S1063779616040092>
8. Churakov A.V., Belushkin A.V., Bogdzel A.A., Drozdov V.A., Kruglov V.V., Kulikov S.A., Levchanovski F.V., Litvinenko E.I., Milkov V.M., Murashkevich S.M., Panteleev T.T., Prikhodko V.I., Shvetsov V.N., Zhuravlev V.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1021. P. 012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1021/1/012021>
9. Dragunov Y.G., Tretiyakov I.T., Lopatkin A.V., Romanova N.V., Lukasevich I.B., Ananyev V.D., Vinogradov A.V., Dolgikh A.V., Yedunov L.V., Pepelyshev Y.N., Rogov A.D., Shabalin E.P., Zaikin A.A., Golovnin I.S. // At. Energy. 2012. V. 113. P. 29. <https://doi.org/10.1007/s10512-012-9591-9>
10. Levchanovski F.V., Gebauer B., Litvinenko E.I., Nikiforov A.S., Prikhodko V.I., Schulz C., Wilpert T. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. 2004. V. 529. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.05.023>
11. Levchanovsky F.V., Litvinenko E.I., Nikiforov A.S., Gebauer B., Schulz C., Wilpert T. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. 2006. V. 569. P. 900. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.09.091>
12. Levchanovsky F.V., Litvinenko E.I., Nikiforov A.S., Gebauer B., Schulz C., Wilpert T. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. 2007. V. 572. P. 1004. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.12.013>
13. Levchanovskiy F.V., Murashkevich S.M. // Proc. of the XXIV International Symposium on Nuclear Electronics and Computing NEC'2013. Varna, Bulgaria, 9–16 Sept. 2013. Dubna: JINR, 2013. P. 176. <http://nec2013.jinr.ru/pdf/nec2013.pdf>
14. <https://www.caen.it/products/n6730/>
15. Litvinenko E.I., Bogdzel A.A., Churakov A.V., Levchanovsky F.V., Rossa L., Sauer O.-P., Wilpert T. // NOBUGS 2016 Proc. New Oppor. Better User Gr. Softw., 2016. P. 65. <https://doi.org/10.17199/NOBUGS2016.9>
16. Belushkin A.V., Bogdzel' A.A., Zhuravlev V.V., Kutuzov S.A., Levchanovski F.V., Litvinenko E.I., Jai L.Y., Panteleev T.T., Prikhod'ko V.I., Chernikov A.N., Churakov A.V., Shevtsov V.N. // Phys. Solid State. 2010. V. 52. P. 1025. <https://doi.org/10.1134/S1063783410050306>
17. Bogdzel A.A., Kruglov V.V., Milkov V.M., Panteleev T.T., Churakov A.V. // Phys. At. Nucl. 2018. V. 81. P. 1465. <https://doi.org/10.1134/s1063778818100022>
18. Avdeev M.V., Bodnarchuk V.I., Petrenko V.I., Gapon I.V., Tomchuk O.V., Nagorny A.V., Ulyanov V.A., Bulavin L.A., Ak-senov V.L. // Crystallogr. Reports. 2017. V. 62. P. 1002. <https://doi.org/10.1134/s1063774517060025>
19. Levchanovskiy F.V., Murashkevich S.M. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V. 13. P. 591. <https://doi.org/10.1134/s1547477116050332>
20. Богдзель А.А., Велешки С., Журавлев А.И., Журавлев В.В., Левчановский Ф.В., Кирилов А.С., Михин М.В., Петухова Т.Б., Мурашкевич С.М., Приходько В.И., Суротин А.П., Калюканов А.И., Фыкин Л.Е. // ПТЭ. 2013. № 2. С. 49. <https://doi.org/10.7868/S0032816213020031>
21. Litvinenko E.I., Bogdzel A.A., Bodnarchuk V.I., Churakov A.V., Gapon I.V., Drozdov V.A., Kulikov S.A., Murashkevich S.M., Nagorny A.V. // Proc. of the 27th Intern. Symposium Nuclear Electronics and Computing (NEC'2019). Budva, Montenegro, Sept. 30–Oct. 4, 2019. P. 165. <http://ceur-ws.org/Vol-2507/165-169-paper-28.pdf>