

РАЗРАБОТКА МАЛОГАБАРИТНОГО СПУТНИКОВОГО ПРИБОРА SIDRA ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПОТОКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

А.В. Дудник^{1,2}, Е.В. Курбатов¹, Я. Сильвестер³, М. Сиарковски³, М. Ковалински³,
В.А. Тарасов⁴, Л.А. Андрищенко⁴, И.Л. Зайцевский⁵, Э. Валтонен⁶

¹ Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины (РИ НАНУ)

² Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина
Министерства образования и науки Украины (ХНУ им. В.Н. Каразина)

³ Отделение физики Солнца, Центр космических исследований
Польской академии наук, Польша (ЦКИ ПАН)

⁴ Институт сцинтилляционных материалов
Национальной академии наук Украины (ИСМА НАНУ)

⁵ Институт проблем безопасности атомных электростанций
Национальной академии наук Украины (ИПБ АЭС НАНУ)

⁶ Кафедра физики и астрономии, Университет г. Турку, Финляндия

Необходимость разработки и научные задачи, решаемые с использованием прибора SIDRA

Совместный анализ данных, полученных солнечным рентгеновским спектрофотометром SphinX и спутниковым телескопом электронов и протонов СТЭП-Ф на борту космического аппарата «КОРОНАС-Фотон», показал значительную разницу в характере энергетических спектров электронов в области Южно-Атлантической Аномалии (ЮАА), внешнего и внутреннего радиационных поясов [1]. Наблюдения показали наличие на малых высотах двух внутренних электронных радиационных поясов Земли даже при очень слабых геомагнитных бурях [2]. Причем энергетический спектр дополнительного внутреннего пояса значительно мягче спектра основного. Кроме того, пучки электронов под радиационными поясами на высоте ~550 км носят ярко выраженный анизотропный характер в сравнении с почти изотропным распределением потоков частиц в районе ЮАА на тех же высотах. Данные результаты получены в солнечном спокойном периоде за короткий промежуток времени и нуждаются в уточнении и подтверждении. В связи с этим остается актуальной задачей дальнейшее изучение динамики потоков и энергетических спектров электронов.

Практически неизученной является природа появления микровсплесков электронов на низ-

ких и приэкваториальных широтах под радиационными поясами Земли на высотах в несколько сотен километров от поверхности Земли. Микровсплески наблюдаются в тех зонах магнитосферы, где их не должно быть согласно моделям распределения заряженной радиации, а именно — на низких широтах и вблизи экватора в областях, далеко отстоящих от магнитной аномалии.

Условия в межпланетной плазме далеко за пределами магнитосферы Земли, в особенности, вблизи Солнца, ожидаются отличающимися значительно от тех, которые наблюдаются внутри магнитосферы. Существует большая вероятность, что высокоэнергетические частицы, ускоренные во время солнечных вспышек, на ударных фронтах корональных выбросов массы, ассоциированные с солнечными радиовсплесками II типа и (или) солнечными протонными вспышками, должны достаточно часто выбрасываться из солнечной короны. Эти энергичные частицы несут важную информацию о параметрах плазмы и процессах, происходящих в областях, где они ускоряются. Помимо этого, взаимодействие частиц со спутником подвергает электронные системы и приборный состав космического аппарата значительной угрозе.

В ходе осуществления межпланетной миссии «Интергелиозонд» компактный телескоп заряженных частиц будет работать в составе рентгеновского спектрофотометра ChemiX с целью выработки сигналов предупреждения о повы-

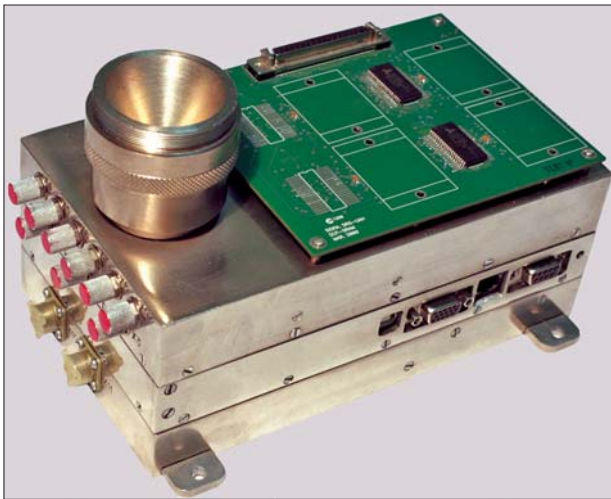


Рис. 1. Общий вид лабораторного макета прибора SIDRA

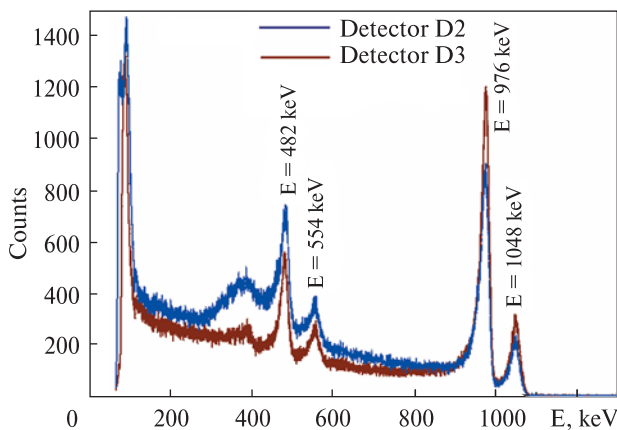


Рис. 2. Энергетические спектры электронов от источника ^{207}Bi , зарегистрированные кремниевыми детекторами лабораторного макета прибора

шенных потоках заряженных частиц и необходимости защитить сенсоры спектрофотометра от разрушительных доз радиации.

Состав и функциональные узлы прибора

Лабораторный макет прибора SIDRA (Satellite Instrument for Determination of Radiation environment) показан на рис. 1 [3–8]. Детекторная головка представляет собой телескопическую систему, состоящую из 3-х высокоомных кремниевых PIN-детекторов различной толщины и органического сцинтилляционного детектора. Непосредственно под детекторной головкой расположен модуль обработки аналоговых сигналов. Он состоит из 3-х однотипных каналов, включающих малошумящие зарядочувствительные предварительные усилители, формирующие усилители, масштабирующие усилители с программно регулируемые коэффициентами

усиления, и отдельного канала на основе усилителя-формирователя. Дополнительно, 1-й, 2-й и 3-й каналы обработки сигналов включают в себя устройства выборки и хранения и быстрые аналого-цифровые преобразователи. Основными задачами, выполняемыми модулем цифровой обработки сигналов, являются: сбор и первичная обработка цифровых данных, поступающих от аналого-цифровых преобразователей; идентификация сортов частиц и их энергий; пересылка научных данных в бортовой компьютер [9].

Модуль вторичного питания расположен в нижней части прибора и имеет два идентичных полуконспекта, собранных на одной печатной плате. Модуль работает по принципу «холодного» резервирования. Защитные схемы предусмотрены в цепях как первичного, так и вторичного питания. Выбор включенного полуконспекта осуществляется путем подачи телекоманды. Предусмотрены контроль всех величин вторичных напряжений обоих полуконспектов с помощью телеметрической системы КА.

PIN-детекторы детекторной головки изготовлены из сверхчистого кремния. Они защищены от прямого попадания солнечного света и низкоэнергетических частиц магнитосферной и межпланетной плазмы алюминиевой фольгой толщиной ~ 20 мкм. На рис. 2 показаны энергетические спектры конверсионных электронов от β -радиоактивного источника ^{207}Bi , зарегистрированные с помощью детекторов Д2 и Д3 с использованием обычной лабораторной техники при нормальной температуре и влажности. Спектры показывают очень хорошую эффективность регистрации для наибольшей энергии $E_c = 1048$ кэВ. Для детектора Д3 эффективность регистрации выше, чем для детектора Д2, ввиду большей толщины и, соответственно, большего количества полностью остановившихся электронов. Хорошее энергетическое разрешение, которое варьирует в диапазоне от $\Delta E = 14$ кэВ до $\Delta E = 17$ кэВ для электронов, имеющих энергии $E_c = 0,4\text{--}1$ МэВ, позволяет построить прибор SIDRA как спектрометр энергий заряженных частиц с шагом квантования по энергиям $\Delta E \geq 20$ кэВ.

Зарядочувствительные предварительные усилители (ЗЧПУ) построены на основе широкополосных операционных усилителей. Они содержат в себе цепи обратной связи, в которых емкость обратной связи C_f определяет чувствительность ЗЧПУ — $S_{\text{ЗЧПУ}}$, выражаемую в единицах мВ/МэВ. Формирующие усилители построены на базе активного полосового фильтра и имеют цепи восстановления базовой линии, ко-

торые эффективно функционируют при частоте следования импульсных сигналов до $f = 250$ кГц. Масштабирующие усилители изменяют коэффициенты усиления аналоговых спектрометрических каналов путем подачи соответствующей команды от бортового компьютера. При этом изменяется диапазон регистрируемых энергий. Диапазон выходных напряжений $U = 25\text{--}3600$ мВ соответствует линейной части характеристики $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ устройств выборки и хранения спектрометрических каналов аналоговой обработки сигналов. Длительность выходных сигналов формирующего усилителя составляет $\sim 2,1$ мкс на уровне $0,1 U_{\text{max}}$, где U_{max} — максимальная амплитуда выходных сигналов. Устройство выборки и хранения имеет широкий диапазон длительностей сигналов для запоминания, малые искажения и максимальный темп счета до $f = 600$ кГц. Максимальные скорости нарастания сигналов пиковых детекторов $W = 8,1$ В/мкс.

Каждый канал модуля обработки аналоговых сигналов имеет внешние разъемы, позволяющие подавать тестовые сигналы на входы ЗЧПУ и наблюдать выходные сигналы формирователей и пиковых детекторов на осциллографе во время регулировки прибора. На рис. 3 представлен общий вид каналов аналоговой обработки сигналов одноименной печатной платы со стороны установки компонентов.

Исследования сцинтилляторов малых размеров стандартной формы для выбора антисовпадательного детектора телескопической системы

В качестве активной защиты телескопических систем спутниковых спектрометров заряженных частиц часто используют сцинтилляторы, просматриваемые вакуумными фотоэлектронными умножителями (ФЭУ). Последние требуют наличия высоковольтного питающего напряжения, имеют значительные габариты; резисторы делителей напряжения имеют заметное тепловыделение. В последнее время все чаще находят применение кремниевые ФЭУ, почти не уступающие вакуумным ФЭУ по чувствительности, однако имеющие намного меньшие габариты и вес. Для выбора формы и режимов включения последнего антисовпадательного детектора телескопической системы лабораторного макета прибора SIDRA были проведены исследования чувствительности и шумовых параметров малогабаритных неорганических и органических сцинтилляционных детекторов. В качестве фотоприемников использовались вакуумный ФЭУ-

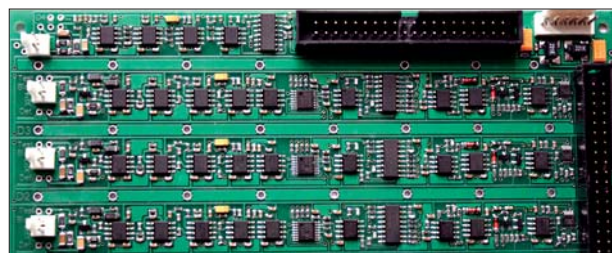


Рис. 3. Общий вид каналов аналоговой обработки сигналов со стороны установки компонентов



Рис. 4. Сцинтилляционный детектор на основе паратерфенила и кремниевого ФЭУ лабораторного образца прибора SIDRA

119, кремниевый PIN фотодиод S5106 с активной площадью 5×5 мм² и кремниевый ФЭУ S10931-050P с активной площадью 3×3 мм² японской фирмы «Hamamatsu Photonics» [10–12]. В качестве сцинтилляторов использовались стильбен; паратерфенил; йодид цезия, активированный таллием — CsI(Tl), и полистирольный пластмассовый сцинтиллятор кубической формы и объемом $10 \times 10 \times 10$ мм³.

Измерения энергетических спектров от радиоактивного изотопа γ -квантов ^{137}Cs подтвердили, что использование кремниевого ФЭУ дает хорошее отношение сигнал/шум со всеми сцинтилляторами, включая пластмассовый сцинтиллятор, имеющий низкий световой выход, близкий к 5 фотонов/кэВ поглощенной энергии. Анализ шумовых характеристик детекторов, состоящих из кристалла CsI(Tl) и трех разных фотоприемников, показал, что энергетический эквивалент шумов для вакуумного ФЭУ составил $\approx 4,1$ кэВ, для кремниевого ФЭУ — $\approx 6,5$ кэВ и для кремниевого PIN фотодиода большой площади — ≈ 64 кэВ. В дополнение к высокому уровню энергетического эквивалента шумов фотодиодов, большим неудобством их использования является одновременное детектирование γ -квантов с энергиями в несколько десятков кэВ в экспериментах с регистрацией смешанной заряженной радиации, как, например, при исследовании

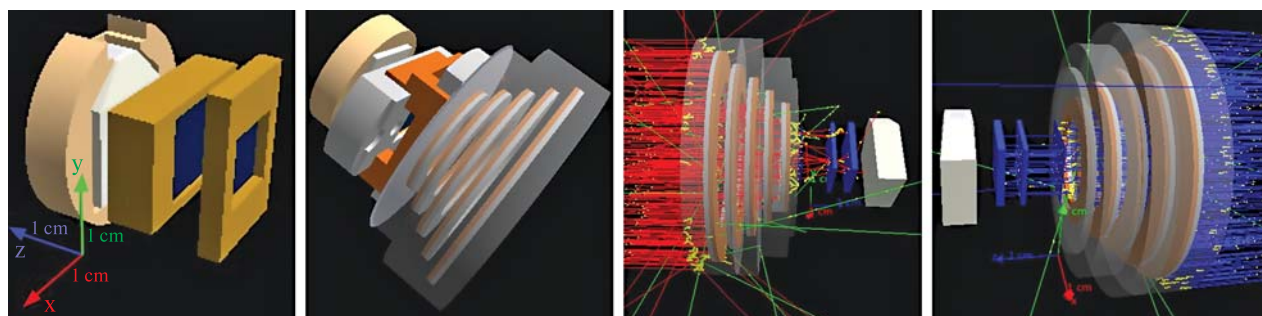


Рис. 5. Примеры визуализации аналитической модели детекторной головки лабораторного макета прибора SIDRA и треков частиц при их вертикальном падении к плоскостям детекторов: электронов (красный цвет), протонов (синий цвет). Зеленым цветом показаны треки рожденных вторичных γ -квантов, желтым — δ -электронов

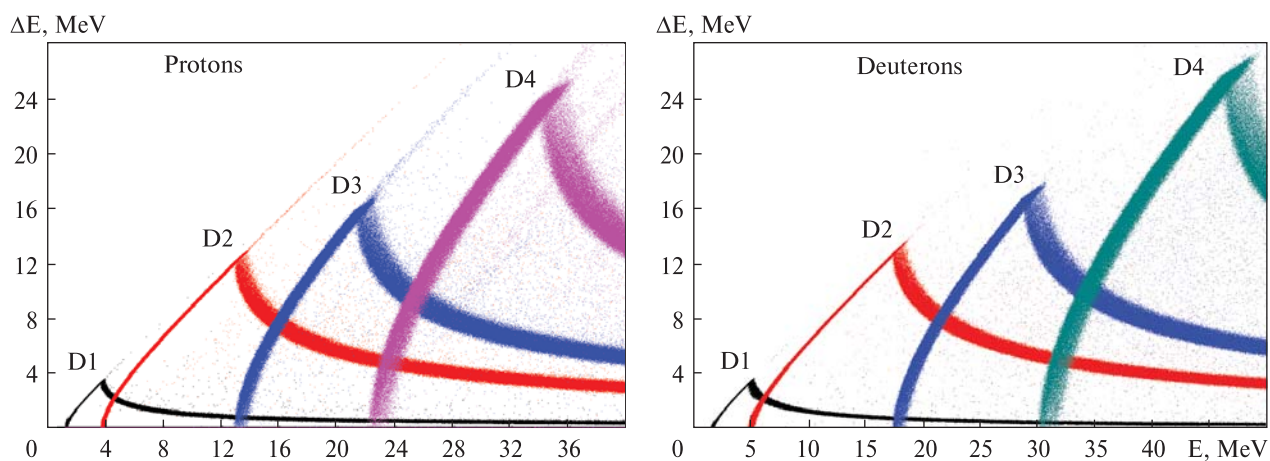


Рис. 6. Зависимости поглощенных энергий ΔE в каждом из детекторов телескопа от первичных энергий протонов и дейтронов

околоземного пространства. Исследования легкого сцинтилляционного детектора на основе паратерфенила в качестве кандидата для нижнего детектора телескопической системы прибора SIDRA с использованием различных фотоприемников позволили получить величину светового выхода, близкую к 27 фотонов/кэВ поглощенной энергии, удовлетворяющую требованиям к антисовпадательному детектирующему слою. В результате была выбрана форма детектора со световодом из материала сцинтиллятора для собирания света на активную площадь многопиксельного счетчика оптических фотонов, изображенная на рис. 4 [13].

Компьютерное моделирование откликов детекторов на прохождение частиц

В качестве инструмента моделирования аналитической модели детекторного модуля макета прибора выбрана библиотека программ GEANT-4, используемая для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество методом Монте-Карло. Разработана архитектура и методы реализации классов, ко-

торые описывают конструкцию детекторного модуля, характер регистрируемых событий, порядок сохранения необходимой информации и методы генерации заряженных частиц. В результате сборки проекта получена математическая модель детекторного модуля в среде GEANT-4-9.6.2, пригодная для моделирования прохождения заряженных частиц высоких энергий через телескопическую систему детекторов и визуализации треков первичных и вторичных частиц. Аналитическая модель выполнена в нескольких конфигурациях, наиболее перспективная из которых включает в себя три кремниевых детектора в специально спроектированных металлических держателях, сцинтилляционный детектор в светоотражающей упаковочной пленке, защитную фольгу, корпус детекторного модуля, биметаллический ступенчатый коллиматор. На рис. 5 представлены примеры визуализации математической модели детекторной головки лабораторного макета прибора, выполненные в среде GEANT-4-9.6.2, и примеры визуализации треков электронов и протонов с монохроматическими первичными энергиями.

Осуществлено моделирование откликов детекторов на прохождение электронов, протонов, дейтронов и альфа-частиц в углах прихода $\pm 42^\circ$ относительно оси OZ прибора; число первичных частиц для каждого сорта частиц с фиксированной энергией выбрано равным 10^6 . Получены зависимости энергетических потерь от первичной энергии частиц в каждом из детекторных слоев телескопа. На рис. 6 представлены зависимости поглощенных энергий протонов и дейтронов в каждом из детекторов от их первичной энергии.

Проверка работоспособности и предварительные испытания лабораторного макета

Проверка работоспособности детекторов и модуля аналоговой обработки сигналов проводилась с использованием изотопов радиоактивных источников и ускоренных легких ядер на циклотронном ускорителе Института ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова [7]. В качестве радиоактивных источников использовались источники конвер-

сионных электронов ^{207}Bi , альфа-частиц ^{226}Ra и низкоэнергетичных γ -квантов ^{241}Am . Для экспериментов на циклотроне использовались ускоренные пучки протонов, дейтронов и альфа-частиц с энергиями до ~ 7.5 МэВ/нуклон. С помощью набора калиброванных алюминиевых пластин разной толщины на входе детекторов были получены упомянутые частицы с энергиями $E = 7.5\text{--}21$ МэВ. Предложенная методика комбинированных градуировочных измерений, а также результаты компьютерного моделирования методом Монте-Карло являются источником исходных данных для создания логики обработки сигналов и программного обеспечения для микропроцессора модуля цифровой обработки сигналов прибора.

Проведены предварительные тепловакуумные испытания лабораторного макета прибора при значении давления внутри вакуумной камеры $P = (2\text{--}8) \times 10^{-5}$ Торр. Значения давления зависели от степени нагрева или охлаждения макета прибора. Проверка работоспособности макета прибора проводилась при: 1) постоянной температуре платформы, на которой был закреплен

Основные технические характеристики лабораторного макета прибора SIDRA в сравнении с подобными характеристиками приборов SIXS, EPS и SEM-2 космических аппаратов VepiColombo, GOES и POES

Характеристика	Лабораторный макет прибора SIDRA	SIXS / VepiColombo	EPS / GOES	SEM-2 / POES
Вес, кг	<2,0	1,8	15,0	15,0
Размеры, мм ³	205 × 145 × 135	366 × 208 × 145	Нет данных	18,6 × 10 ⁶
Энергопотребление при напряжении U = 27 В, Ватт	<6	4,4	20,0	10,0
Выходные интерфейсы	Ethernet, serial, SpaceWire	Serial, SpaceWire	Нет данных	Нет данных
Угол зрения	~65°	5 телескопов, каждый — 50°	телескоп — 70°, 3 купола, каждый — 60°	2 × 15°, —x, —x + 90°
Активная площадь 1-го детектора, мм ²	100	4,9	телескоп — 100, купол — 25	25; 50
Типы детекторов частиц	Si (PIN), сцинтилляционный на основе п-терфенила	Si(PIN), сцинтилляционный на основе CsI(Tl)	Si поверхностно-барьерный, Si (PIN)	Si поверхностно-барьерный, Si (PIN)
Диапазон энергий частиц, МэВ	электроны — 0,06÷2,4; протоны — 1,2÷14; дейтроны — 1,6÷18; альфа — 5÷52	электроны — 0,1÷3,04; протоны — 1÷30	электроны — 0,6÷4,0; протоны — 0,74÷900; альфа — 3,8÷>500	электроны — 0,03÷7,0; протоны — 0,03 ÷ 6,9; >16, >35, >70, >140
Количество энергетических каналов	65 каждого сорта	8	16	протоны — 2 × 6; электроны — 2 × 3
Временное разрешение, сек	1, 10	1	3 ÷ 12	1, 2, 4
Скорость передачи телеметрической информации, бит/сек	~3400	~550	Нет данных	160

макет прибора; 2) во время нагрева платформы до + 50 °С; 3) во время медленного охлаждения платформы до температуры –34 °С. Перед осуществлением испытаний в разных точках прибора были установлены температурные датчики — калиброванные термодатчики из хромель-алюмелевых сплавов: на поверхности платформы, на поверхности программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) Xilinx Spartan 3 XC3S1500 4FG456 FGA и на поверхности радиатора DC—DC конвертеров платы вторичного питания. Лабораторный макет прибора SIDRA продемонстрировал свою работоспособность в условиях высокого вакуума при охлаждении до температуры –34 °С и при нагревании платформы до температуры +50 °С. Одновременно была подтверждена правильность установки теплоотводящего радиатора на поверхности DC—DC конвертеров платы вторичного питания, а также подтверждена необходимость установки подобного радиатора на поверхности ПЛИС.

На основе проведенных испытаний, измерений электрических характеристик, результатов компьютерного моделирования с помощью библиотеки программ GEANT4 и расчетов были получены основные технические характеристики лабораторного макета прибора, в сравнении с аналогичными приборами, установленными на спутниках VeriColombo, GOES i POES (таблица).

ЛИТЕРАТУРА

1. Дудник А.В., Подгурски П., Сильвестер Я., Гбурек С., Ковалински М., Сиарковски М., Плоциеньяк С., Бонкала Я. Рентгеновский спектрофотометр SphinX и спектрометр частиц СТЭП-Ф спутникового эксперимента КОРОНАС-ФОТОН — предварительные результаты совместного анализа данных / *Астрономический вестник*. — 2012. — Т. 46. — № 2. — С. 173—183.
2. Dudnik O. Unexpected behavior of subrelativistic electron fluxes under Earth radiation belts // 4th International workshop NEPPA/SOLARIS-2012 (9-12 October 2012. Boulder, Colorado, USA). — Abstract book. — P. 15.
3. Дудник А.В., Прието М., Курбатов Е.В., Санчез С., Тимакова Т.Г., Титов К.Г., Парра П. Малогабаритный прибор для мониторинга электронов и ядер высоких энергий в открытом космическом пространстве // *Космічна наука і технологія*. — 2012. — Т. 18. — № 6. — С. 22—34.
4. Дудник А.В., Прието М., Курбатов Е.В., Санчез С., Тимакова Т.Г., Спасский А.В., Дубина В.Н., Парра П. Прибор SIDRA для измерения потоков частиц на спутниковых высотах: лабораторный прототип // *Астрономический вестник*. — 2013. — Т. 47. — № 1. — С. 61—69.
5. Prieto M., Dudnik O.V., Sanchez S., Kurbatov E.V., Timakova T.G., Tejedor J.I.G., Titov K.G. Breadboard model of the SIDRA instrument designed for the measurement of charged particle fluxes in space // *Journal of Instrumentation*. — April 2013. — Vol. 8. — T04002.
6. Dudnik O.V., Prieto M., Kurbatov E.V., Sanchez S., Titov K.G., Sylwester J., Gburek S., Podgorski P. Functional capabilities of the breadboard model of SIDRA satellite-borne instrument // *Вопросы атомной науки и техники*. — 2013. — №. 3 (85) — Вып. 60. — Серия «Ядерно-физические исследования». — С. 289—296.
7. Dudnik O.V., Kurbatov E.V., Avilov A.M., Prieto M., Sanchez S., Spassky A.V., Titov K.G., Sylwester J., Gburek S., Podgorski P. Results of the first tests of the SIDRA satellite-borne instrument breadboard model // *Вопросы атомной науки и техники*. — 2013. — №. 3 (85). — Вып. 60. — Серия «Ядерно-физические исследования». — С. 297—302.
8. Dudnik O.V., Kurbatov E.V., Trefilova L.M., Andryushenko L.A., Tarasov V.O., Zajtsevskiy I.L. Breadboard model of small-sized satellite instrument on the registration of energy charge particle fluxes / Міжнародна українсько-японська конференція з питань науково-промислового співробітництва (24—25 жовтня 2013 р., Одеса, Одеський національний політехнічний університет, Україна). — Матеріали конференції. — С. 68—71.
9. Dudnik O.V., Sanchez S., Prieto M., Kurbatov E.V., Timakova T.G., Dubina V.N., Parra P. Onboard instrument SIDRA prototype for measurements of radiation environment in the space / 39th Scientific Assembly of COSPAR. — July 14—22, 2012. Mysore, India). — Abstracts. Session H0.3: «Technical Development of Instrumentation for Current Missions». — STW-B-153 H0.3-0023-12. — P. 106.
10. Dudnik O.V., Kurbatov E.V., Tarasov V.A., Andryushenko L.A., Boyarintsev A.Yu., Valtonen E. Response and noise characteristics of small-sized inorganic and organic scintillation detectors measured with vacuum and solid-state photodetectors // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. — 2012. — Vol. 664. — Issue 1. — P. 148—153.
11. Дудник А.В., Курбатов Е.В., Валтонен Э. Амплитудные и скоростные характеристики многопиксельных счетчиков фотонов S10931-050P и S10931-100P производства «Hamamatsu Photonics» // *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна* № 991, серія: фізична «Ядра, частинки, поля». — 2012. — Вип. 1 (53). — С. 69—74.
12. Дудник А.В., Курбатов Е.В., Валтонен Э. Выбор напряжений обратных смещений для кремниевых ФЭУ S10931-050P и S10931-100P // *Вопросы атомной науки и техники*. Серия «Ядерно-физические исследования». — 2012. — № 4 (80). — Вып. 59. — С. 210—215.
13. Патент України № 86274, G01T 1/20. — Сцинтиляційний детектор на основі органічного кристалу. — Андрющенко Л.А., Тарасов В.О., Гриньов Б.В., Дудник О.В., Курбатов Е.В. Заявлено 11.06.2013, № U2013 07391. — Опубл. 25.12.2013. — Бюл. № 24.