

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЮСТИРОВКИ ДЕТЕКТОРОВ В ПРОЕКТЕ ДЧС-NICA

*А. Курганов^{а,1}, О. Васильев^а, Д. Карманов^а, И. Ковалев^а, А. Панов^а,
Д. Подорожный^а, А. Сливин, Е. Сыресин^б, А. Турундаевский^а,
Г. Филатов^б, А. Шульга^а*

^а Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

^б Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Проект ДЧС-NICA разработан для решения остро стоящей задачи измерения радиационной стойкости электронной комплектующей базы космических аппаратов в условиях космического пространства. Для ее решения требуется хорошее координатное разрешение, обеспечить которое без юстировки плоскостей детекторов установки невозможно. В статье представлена методика, позволяющая применить ее, основываясь на экспериментальных данных.

The SDC-NICA project was developed to solve the problem of measuring the radiation resistance of spacecraft's electronic components in outer space conditions. To solve this problem, good coordinate resolution is required, which is impossible to achieve without aligning the detector planes. The paper presents a methodology that allows it to be carried out based on experimental data.

PACS: 94.05.–а; 81.70.–q

ВВЕДЕНИЕ

С развитием технологий космической отрасли и уровня решаемых научно-технических задач как в околоземном, так и межпланетном пространстве повышаются требования к устанавливаемой электронике. Отдельным вопросом стоит радиационная стойкость электронной компонентной базы (ЭКБ) космических аппаратов (КА), от которой напрямую зависит надежность и возможная продолжительность работы.

Радиационное воздействие на ЭКБ принято делить на два типа [1]: накопительные, или дозовые эффекты, и эффекты однократного действия [2], иначе известные как Single Event Effects (SEE) или Single Event Upsets (SEU). Дозовые эффекты вызываются преимущественно сравнительно низкоэнергетичными протонами и электронами солнечного ветра. Их многочисленное воздействие приводит к структурным

¹E-mail: aa.kurganov@rsx.sinp.msu.ru

нарушениям в МОП-структурах электроники и их деградации, что приводит к повышению потребляемой мощности, токов утечки и снижению усилительных характеристик аналоговых трактов. Дозовые эффекты достаточно хорошо экспериментально изучены на протонных и электронных ускорителях.

SEE вызываются непредсказуемыми одиночными воздействиями ядер космических лучей (тяжелых заряженных частиц), не вносящих существенного вклада в дозовые эффекты ввиду их редкости. Однако эти воздействия специфичны за счет больших линейных потерь энергии при пролете через ЭКБ, т.е. большого ионизационного взаимодействия на вещество электроники. Данные воздействия могут привести к существенным нестабильностям, в том числе и к полному отказу ЭКБ.

Эффекты однократного действия могут вызываться как тяжелыми ядрами группы Fe галактических космических лучей (ГКЛ), так и более легкими ядрами с низкой энергией из состава ГКЛ, аномальной компоненты космических лучей и солнечных космических лучей. Влияние более тяжелых ядер возможно, но маловероятно из-за резкого падения потока ядер космических лучей с ростом Z . Экспериментального материала для детального описания SEE недостаточно.

ПРОЕКТ ДЧС-NICA

ДЧС-NICA [3] — детекторная часть установки для изучения радиационной стойкости микросхем и конкретных эффектов, вызываемых ионизационными процессами от симулируемых ядер космических лучей. Система состоит из нескольких детектирующих плоскостей, и ее конструкция позволяет восстанавливать энергию и траекторию частиц.

Плоскости в ДЧС-NICA — трех типов (рис. 1):

- ДП-ВКР — стриповые детектирующие плоскости (ДП) с высоким координатным разрешением (ВКР);
- ДП-НКР — стриповые детектирующие плоскости с низким координатным разрешением (НКР);
- ДП-БКЧ — детектирующие плоскости без координатной чувствительности (БКЧ).

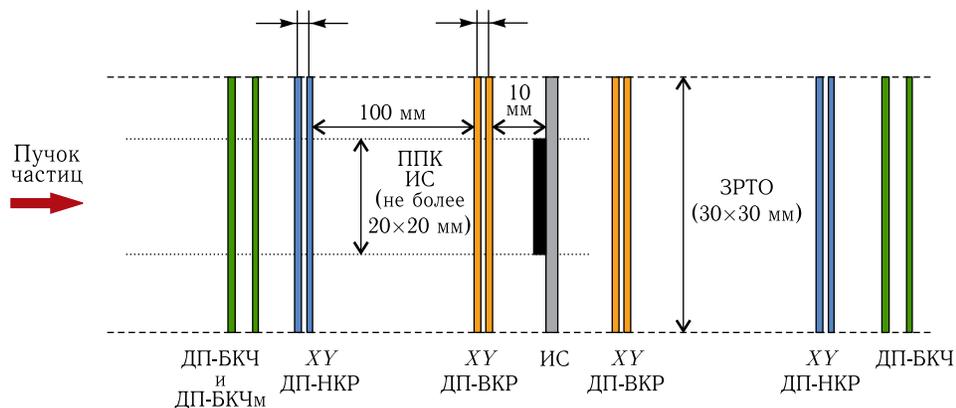


Рис. 1. Установка ДЧС и ее структурная схема

Стоит отметить, что ДП-ВКР и ДП-НКР устанавливаются парами с координатной чувствительностью вдоль взаимно перпендикулярных осей X и Y (основная ось системы — Z). Направление стрипов и координатной чувствительности плоскостей помечено на рис. 1 буквами X и Y .

Все детекторы в установке кремниевые и схожего размера — размер стриповых детекторов составляет 34,0 мм поперек стрипов на 32,4 мм вдоль стрипов, их активная область — 32 мм поперек стрипов и 29,6 мм вдоль стрипов, активная область детектора ДП-БКЧ — 20×20 мм.

На рисунке также обозначено положение исследуемого образца интегральной схемы (ИС) и предельный размер исследуемой области — предельная площадь корпуса ИС (ППК ИС), а также зона размещения тестируемого образца (ЗРТО).

Система может работать в одном из двух основных режимов — режиме установки линейных потерь энергии (ЛПЭ) и режиме ядерной томографии. В режиме установки ЛПЭ частицы останавливаются в установленном образце, а их ЛПЭ в интегральной схеме определяется через энерговыделения частиц в предшествующих плоскостях. Координатная точность в данном режиме требуется для установки положения областей в ИС, приводящих к конкретным сбоям и замеру дозы радиации в различных областях образца.

Второй режим работы системы — режим ядерной томографии. В нем частицы более высоких энергий пролетают образец (а могут и всю установку) насквозь. Измеряя энерговыделение частицы как до, так и после образца, можно определить энергию, оставленную частицей в образце, а значит, и количество вещества, которое она в нем прошла. Таким образом, при достаточной координатной точности возможно исследование структуры микросхемы и привязка ее координат к координатам измеряющей системы.

Как уже было показано в предыдущих статьях [4], координатное разрешение установки более чем удовлетворительно и обеспечивает необходимый результат, и физические процессы вроде множественного рассеяния, по крайней мере, в режиме томографии, не вносят существенного вклада в ошибку. Однако из-за неидеальности сборки аппаратуры координатное разрешение может ухудшиться, и необходимо вклад этого эффекта минимизировать.

МЕТОДИКА ЮСТИРОВКИ ДЕТЕКТОРНЫХ ПЛОСКОСТЕЙ

Из-за люфтов и допусков в механической сборке системы возможны как сдвиги (порядка ~ 1 мм в нашем случае), так и повороты (порядка $\sim 1^\circ$) плоскостей друг относительно друга. В данную ошибку вносит вклад и технология приклеивания детекторов к плоскостям, а также технологический процесс их производства. Когда требуемое координатное разрешение значительно хуже (больше), чем вклад этих сдвигов и поворотов, или, иными словами, размер стрипа всех систем много больше люфтов и механических допусков, ими можно пренебречь. В случае с ДЧС-НИСА, однако, это не так — исходя из поставленных задач система должна иметь хорошее координатное разрешение как в режиме установки ЛПЭ, так и в режиме ядерной томографии. Процесс реконструкции положений сдвигов и поворотов плоскостей друг относительно друга на основании экспериментальных данных обяза-

лен для данного эксперимента и называется юстировкой или алайментом (от англ. alignment). Далее приведена проверенная как на модели, так и на реальных пучковых данных методика юстировки, разработанная для ДЧС-НИСА.

Разработанная методика заключается в следующем.

1. Из банка данных выбираются события, где через систему пролетает только одна частица (не было ядерного взаимодействия изначальной пучковой частицы ни с детекторами системы, ни с веществом деградера, обычно устанавливаемого между исследуемой установкой и выходом пучка для снижения энергии частиц до необходимой).

2. Предполагаются нулевые сдвиги и повороты плоскостей.

3. Проводятся треки частиц в выбранных событиях методом наименьших квадратов (МНК).

4. В среднем по всем событиям минимизируются расстояния от точек прохождения частиц через плоскость до пересечения трека частицы с этой же плоскостью. Процесс данной минимизации будет приведен ниже.

5. При необходимости проводятся дополнительные итерации алгоритма с уже установленными в четвертом шаге сдвигами и поворотами плоскостей, начиная с третьего шага.

6. Методика алаймента завершена. Полученные сдвиги и повороты плоскостей далее используются при обработке данных.

На практике оказалось, что достаточно одной-двух итераций алгоритма. Методика в моделировании проверялась как на трех парах плоскостей (первая ДП-НКР и обе ДП-ВКР), так и на всех четырех. При описании методики будем работать с тремя парами плоскостей для краткости, для четырех пар алгоритм работает аналогично. Все описанные операции юстировки проводились отдельно для плоскостей с чувствительностью вдоль осей X и Y . Стоит отметить, что информация о фитах (МНК-проведенных треках) при работе с одной группой плоскостей (например, вдоль оси X) требуется как из X -, так и Y -направленных плоскостей.

Пример фита, проведенного по точкам попадания частицы в плоскости, показан на рис. 2. На нем первая плоскость ДП-НКР сдвинута вверх (соответственно, при предположении нулевых сдвигов точка попадания располагается «слишком низко»). Величина возможного сдвига преувеличена для ясности. Видно, что фит в плоскости ДП-НКР идет чуть выше, чем точка попадания, в первой плоскости ДП-ВКР — чуть

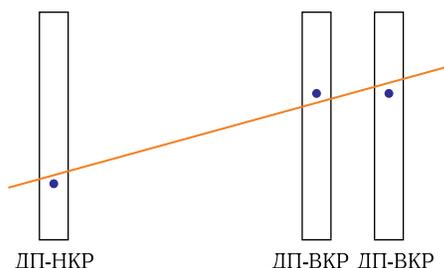


Рис. 2. Пример проведенного трека частицы при наличии сдвигов в плоскостях (масштаб утрирован)

ниже, и в последней плоскости ДП-ВКР — снова чуть выше. Величина данного несоответствия говорит о том, как сильно сдвинута плоскость, и позволяет восстановить сдвиг, предположив его равным данной разнице в положении.

Здесь стоит отметить, что возможно появление моды «параллелепипедного» сдвига плоскостей, когда их сдвиги x_{shift} линейно зависят от положения вдоль оси Z : $x_{\text{shift}} = k_p z + b_p$, где k_p и b_p — параметры параллелепипедного сдвига, а z — координата вдоль главной оси установки. Измерить k_p невозможно, однако можно провести коррекцию, гарантирующую его равенство нулю: угол наклона данной прямой $x_{\text{shift}}(z)$ в среднем по всем событиям покажет значение k_p , и можно ввести коррекцию, вычитающую данную моду из итоговых сдвигов, определенных по средним отклонениям точек попадания частиц в плоскость от их фитов. Однако при проведении такой коррекции теряется информация о направленности пучка и угле поворота установки относительно него — по сути, предполагается его направленность ровно вдоль главной оси. При случайных сдвигах плоскостей, а не повороте всей установки, возникновение существенного k_p маловероятно, поэтому было решено данную коррекцию не совершать.

Углы поворота плоскостей измерялись только относительно главной оси системы — прочие повороты не вносят существенного вклада в работу системы (поскольку их влияние пропорционально $\cos(\alpha)$). Измерялись они следующим образом. При повороте плоскости при изначальном предположении нулевых поворотов с одной стороны плоскости треки частиц пройдут чуть выше точек их попадания в плоскость, а с другой — ниже. На рис. 3 показан пример, в котором первая ДП-БКЧ повернута, но другие плоскости стоят идеально.

Тем самым, измерив зависимость $x_{\text{shift}}(y)$ для каждой из плоскостей со стрипами вдоль оси X (или, наоборот, $y_{\text{shift}}(x)$ для перпендикулярно направленных плоскостей), возможно восстановить угол наклона плоскостей следующим образом: для каждой из плоскостей строится и фитируется линией зависимость $x_{\text{shift}}(y) = k_a y + b_a$. Коэффициент k_a отвечает за наклон прямой, а значит, и за наклон плоскости, а b_a — за ее сдвиг в среднем.

При восстановлении углов поворота плоскостей возможно возникновение моды, аналогичной «параллелепипедному» сдвигу: моды «винта», при которой угол наклона плоскостей k_a линейно зависит от z : $k_a = k_{ap} z + b_{ap}$ (рис. 4). Ее возникновение по физическим причинам (свойств пучка) крайне маловероятно: по сути ротор в векторном

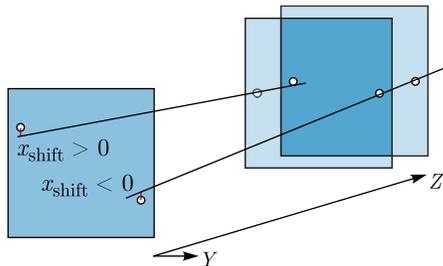


Рис. 3. Проведение фитов при повороте первой плоскости в изначальном предположении нулевых поворотов (масштаб утрирован)

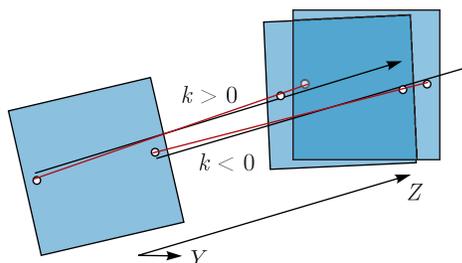


Рис. 4. Мода «винта» при восстановлении углов поворота плоскостей

поле направлений полета частиц должен быть тогда отличен от нуля. Поэтому компенсировать возникновение данной моды необходимо. Сделать это можно, построив в какой-либо плоскости (не обязательно детектирующей) $z = z_s$ зависимость $k_a(y)$. С одной стороны фиты пойдут чуть выше, с другой — чуть ниже (см. рис. 4). Фитируется линией зависимость $k_a(y) = k_{tw}y + b_{tw}$, где k_{tw} и b_{tw} — коэффициенты фиты. Стоит отметить, что исходя из методики МНК средний угол поворота плоскостей b_{tw} будет сведен к нулю. При компенсации данной моды к реконструированным углам поворота плоскостей добавляется угол $(z_p - z_s)k_{tw}$, где z_p — положение компенсируемой плоскости вдоль оси Z . После данной компенсации углы и сдвиги можно считать восстановленными, в чем и заключается четвертый шаг описанного ранее алгоритма.

РАБОТА МЕТОДИКИ ЮСТИРОВКИ ДЕТЕКТОРНЫХ ПЛОСКОСТЕЙ

Работа методики юстировки в моделировании показана на рис. 5. Моделирование проводилось с использованием пакета Geant4 [5]. На рис. 5а и 5б нижние правые два графика отвечают за компенсацию моды «винта» (зависимости $k_a(y)$ и $k_a(x)$), остальные — за основное измерение поворотов и сдвигов плоскостей (зависимости $x_{shift}(y)$ и $y_{shift}(x)$). Каждой точкой обозначено отдельное событие. Видно, что, действительно, зависимости имеют вид широких прямых; линиями показаны проведенные фиты зависимостей. После юстировки и компенсации моды винта все зависимости встают в линию $y = 0$, что говорит о верном определении углов и сдвигов (зависимости после юстировки построены с учетом реконструированных сдвигов и поворотов).

Далее, методика юстировки тестировалась в моделировании в предположении ненулевых изначальных сдвигов и поворотов в шаге 2. По сути, не имеет значения, восстанавливает ли метод реальные сдвиги и повороты или восстанавливает нулевые при ненулевом изначальном предположении. Такой подход был выбран, поскольку моделирование установки с разными поворотами и сдвигами плоскостей крайне затратно. Стоит отметить, что в первоначальном предположении сдвигов и углов при этом заранее компенсировалась мода параллелепипедного сдвига — как было отмечено ранее, ее возникновение крайне маловероятно. Сам алгоритм эту моду не компенсирует. Далее, было построено распределение разницы между реальными и восстановленными сдвигами и поворотами (по сути, отличие от нуля конечных сдвигов и поворотов, т. е. при описанном подходе просто их значение после всего алгоритма юстировки).

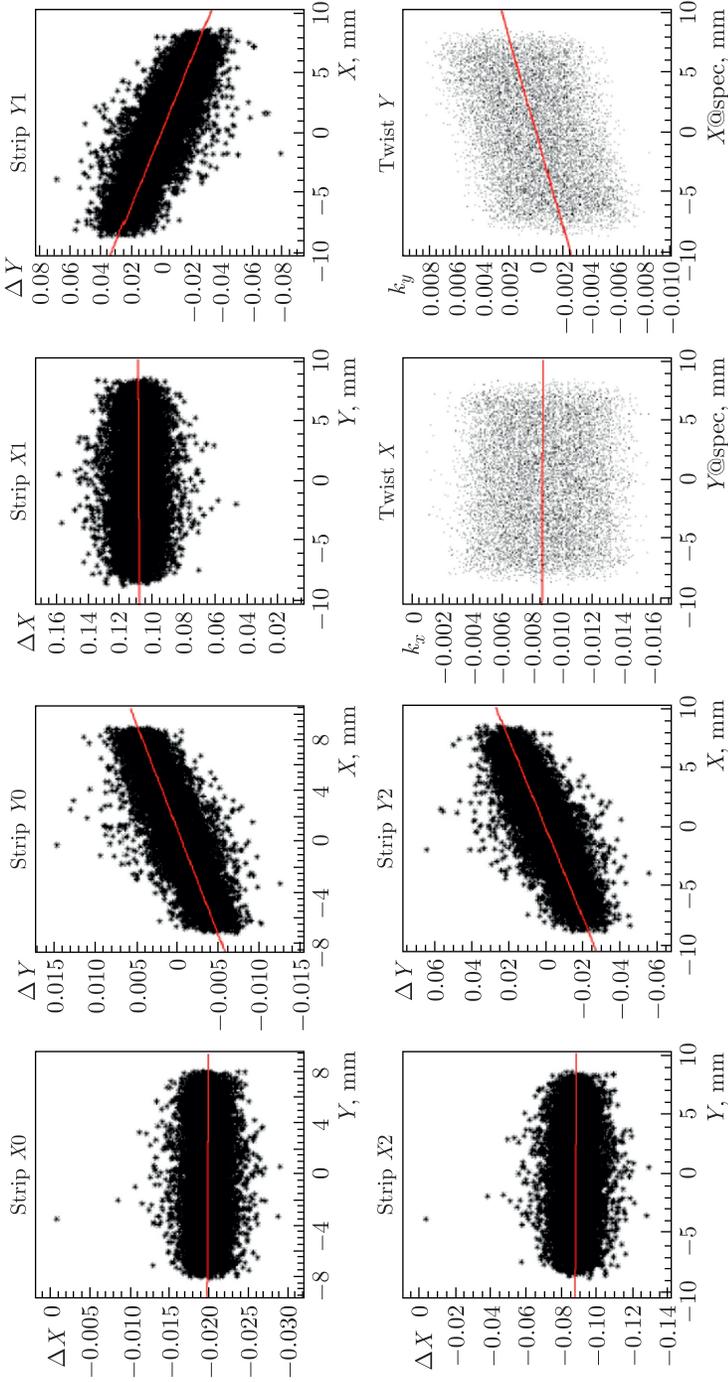


Рис. 5а. Работа методики юстировки плоскостей в моделировании при использовании трех плоскостей до юстировки

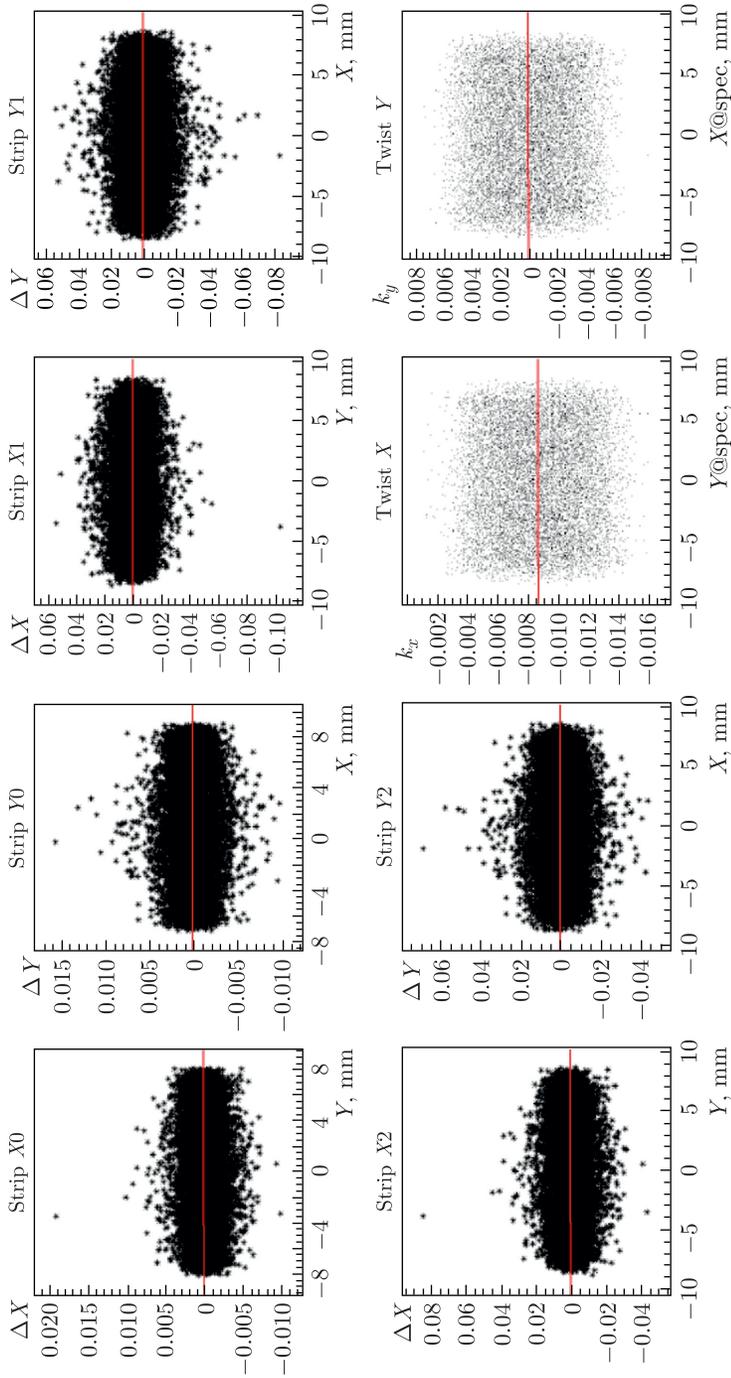


Рис. 56. Работа методики юстировки плоскостей в моделировании при использовании трех плоскостей после юстировки

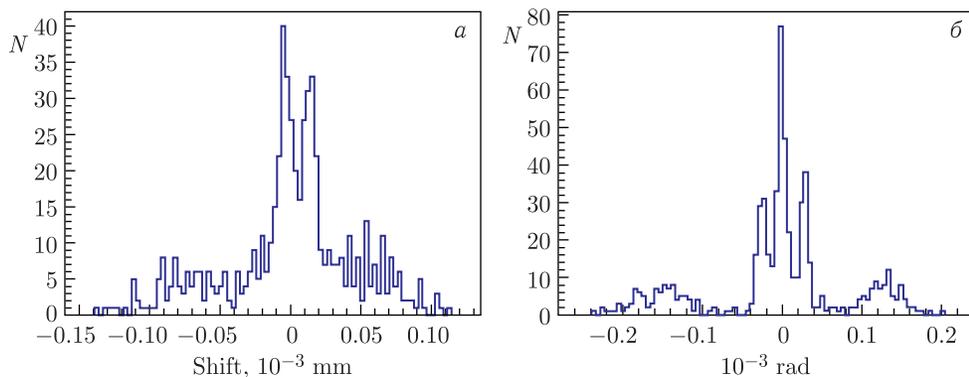


Рис. 6. Ошибка определения сдвига и угла в моделировании

Данные значения отражают ошибку методики юстировки. На рис. 6, *а* показано полученное распределение для сдвигов, на рис. 6, *б* — для углов. Ошибка определения сдвига не превышает 0,15 мкм, угла — 0,2 мкрад.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В декабре 2022 г. был проведен пучковый эксперимент с прототипом спектрометра ДЧС-НИСА. Пучок состоял из ядер ксенона ($Z = 54$) с энергией 3,7 ГэВ/нуклон. Для снижения энергии частиц между установкой и выходом пучка был установлен деградер из свинца толщиной 6 см. Именно на данных этого пучкового эксперимента была проверена методика юстировки.

Практический интерес, как было отмечено ранее, представляют лишь события, в которых через установку пролетает только одна частица без посторонних фрагментов и без фрагментации в самой установке. Для фильтрации «плохих событий» был разработан следующий метод. Назовем «кластерами» стрипов в плоскости подряд стоящие стрипы с некоторым энерговыделением без пропусков. Например, если как «0» обозначить отсутствие энерговыделения, а «1» — его присутствие, то в ситуации 0...011100110...0 в плоскости получится два кластера стрипов, один размером три стрипа, другой размером в два стрипа. При фильтрации событий требовалось, чтобы в каждой плоскости был ровно один кластер стрипов, и его размер не превышал трех стрипов. Такой фильтр гарантирует, что через каждую плоскость проходит лишь одна частица во всех событиях.

Далее к банку данных применялась методика юстировки. При этом количество итераций алгоритма равнялось двум. На рис. 7а показаны графики, аналогичные рис. 5 для экспериментальных данных для четырех плоскостей (компенсация моды винта не показана) до юстировки, а на рис. 7б — после нее. Видно, что все линии снова встают в линию $y = 0$, что говорит об успешности операции. Итоговые сдвиги составили от 60 до 158 мкм, а повороты — от 0,12 до 0,41°.

Стоит обратить внимание на нестандартное поведение плоскости НКР (на рис. 7 — 0У). «Пропуски» в линии связаны с неработоспособностью некоторых стрипов данной плоскости. Фильтр накладывался и на эту плоскость, поэтому событий, проходящих через нерабочие стрипы, в данных нет.

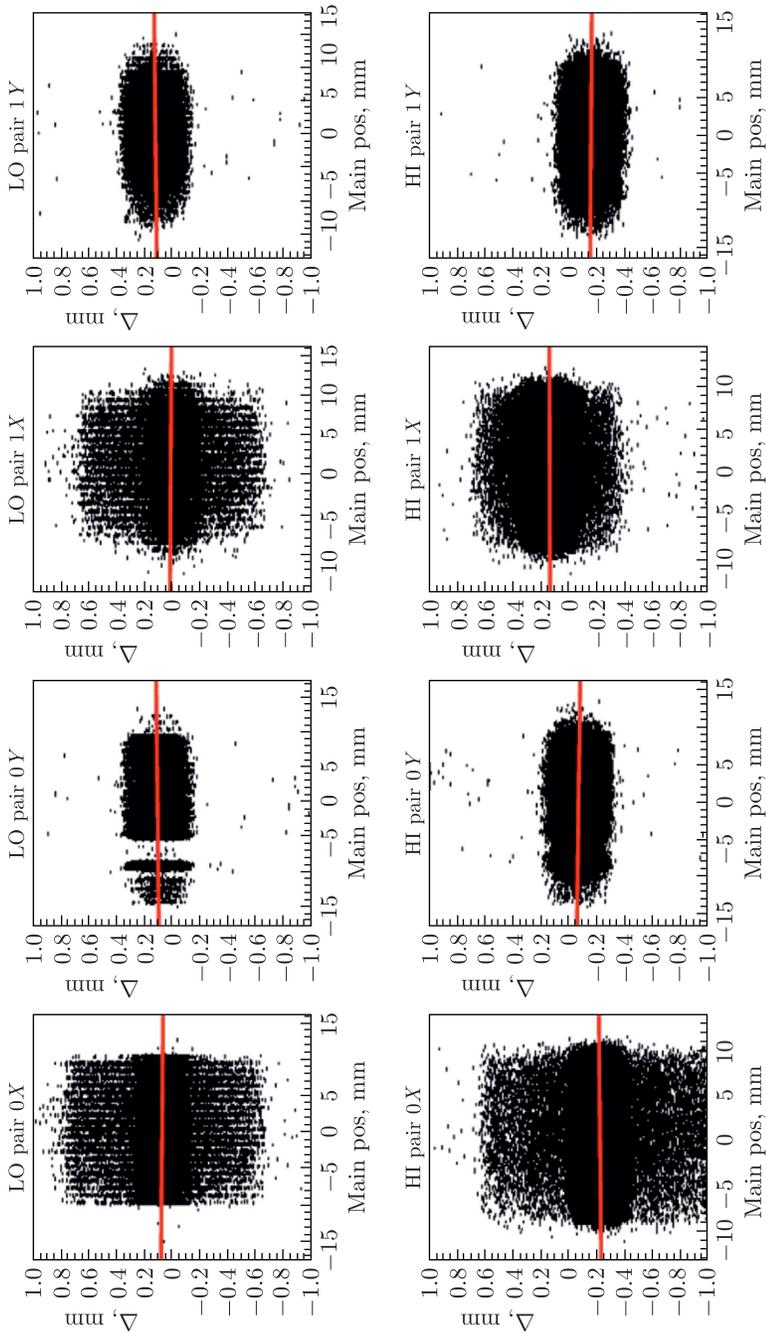


Рис. 7а. Зависимости $x_{\text{shift}}(y)$ и $y_{\text{shift}}(x)$ в экспериментальных данных до проведения юстировки

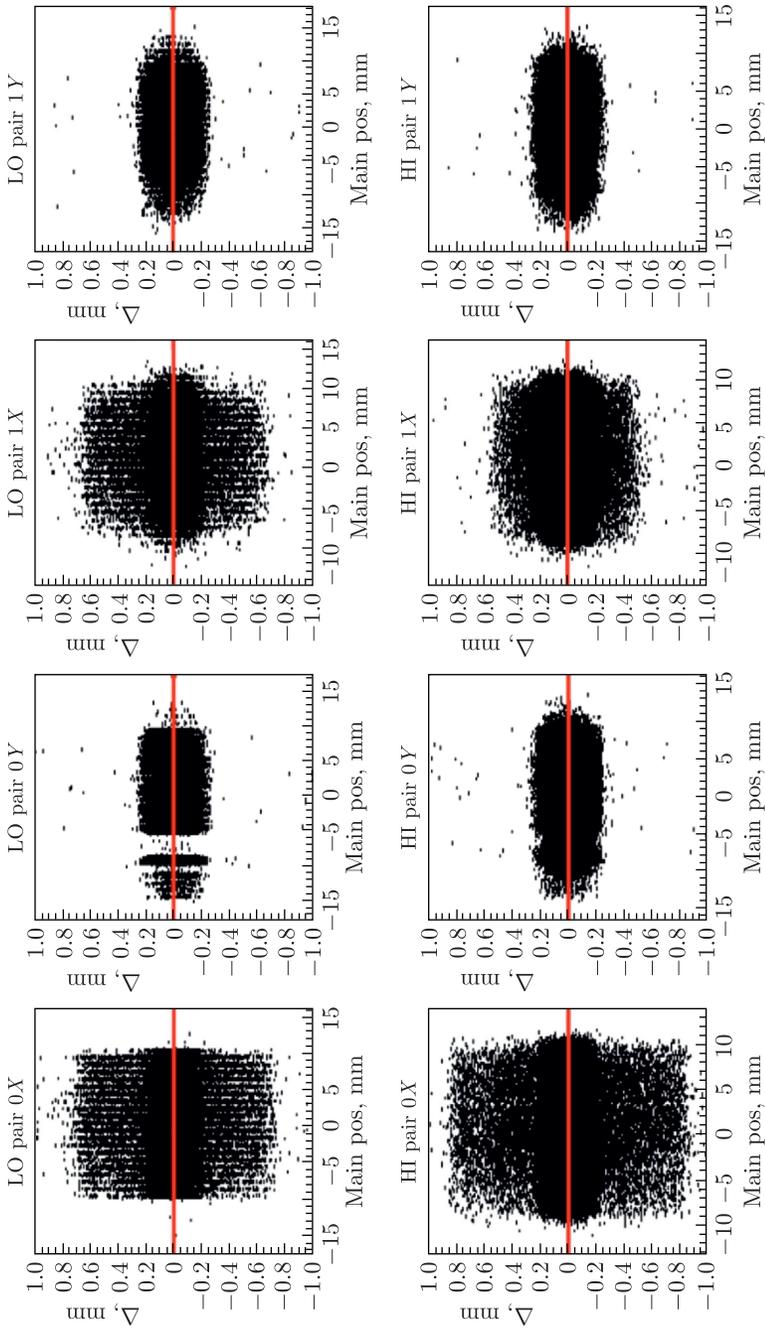


Рис. 76. Зависимости $x_{\text{shift}}(y)$ и $y_{\text{shift}}(x)$ в экспериментальных данных после проведения юстировки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С развитием технологий космической отрасли и уровня решаемых научно-технических задач как в околоземном, так и межпланетном пространстве повышаются требования к устанавливаемой электронике, в особенности к ее радиационной стойкости. Радиационные эффекты принято делить на дозовые и одиночные. Одиночные эффекты могут вызывать существенную нестабильность работы ЭКБ, вплоть до ее полного отказа, однако экспериментального материала для их описания на сегодняшний день недостаточно. Для решения поставленных задач был разработан проект ДЧС-NICA. Его работа требует высокой координатной точности, и потому необходима юстировка плоскостей. В статье приведена разработанная методика юстировки (или алаймента) детекторных плоскостей. Методика позволяет восстанавливать сдвиги и повороты плоскостей вдоль главной оси системы с точностью до 0,15 мкм и 0,2 мкрад. Методика также была протестирована на пучковых данных, из которых видно, что юстировка проводится успешно.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 6 «Ядерная и радиационная физика».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Таперо К. И., Улимов В. Н., Членов А. М.* Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. С. 304.
2. Single Event Effects Specification. <https://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/seespec.htm>.
3. *Васильев О. А., Воронин А. Г., Карманов Д. Е., Ковалев И. М., Курганов А. А., Меркин М. М., Панов А. Д., Подорожный Д. М., Сливин А. А., Сыресин Е. М., Турундаевский А. Н., Филатов Г. А.* Детекторная часть станции для исследований и облучений перспективных изделий полупроводниковой микро- и наноэлектроники пучками ионов высокой энергии // Письма в ЭЧАЯ. 2021. Т. 18, № 2(234). С. 213–219.
4. *Васильев О., Карманов Д., Ковалев И., Кудряшов И., Курганов А., Панов А., Подорожный Д., Сливин А., Сыресин Е., Турундаевский А., Филатов Г.* Результаты предварительного моделирования проекта ДЧС-NICA // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17, № 6(231). С. 833–843.
5. Geant4 — A Simulation Toolkit. <https://geant4.web.cern.ch/>.

Получено 20 сентября 2023 г.