*ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И АТОМНОГО ЯДРА*
*2025. Т. 56, вып. 3. С. 923–966*

# МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ НА СТАНЦИЯХ И КАНАЛАХ ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СИМБО И ИСКРА КОМПЛЕКСА NICA

*И. С. Гордеев* [1,2], *А. А. Сливин* [1], *Г. А. Филатов* [1]

[1] Объединенный институт ядерных исследований, Дубна
[2] Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

Подробно представлена методика моделирования радиационных условий при работе станций и каналов для прикладных исследований СИМБО и ИСКРА комплекса NICA ОИЯИ. Для моделирования использовалась Монте-Карло программа FLUKA. Приводятся и обсуждаются результаты расчетов для основных режимов работы станций. Рассчитаны предельные интенсивности, при которых соблюдается установленное зонирование помещений для персонала. Полученные оценки показывают, что принятые конструктивные решения обеспечивают соблюдение норм радиационной безопасности при эксплуатации станций с определенными в результате моделирования предельными интенсивностями пучка.

The methodology of modeling radiation environment during the operation of stations and beamlines for applied research named SIMBO and ISCRA at the JINR NICA complex is presented in detail. The FLUKA Monte Carlo program was used for modeling. The results of calculations for the main operating modes of the stations are presented and discussed. The maximum operational intensities at which the existing zoning of facilities for personnel can be maintained are estimated. The estimates show that the design solutions adopted ensure compliance with radiation safety standards during the operation of stations with the maximum beam intensities determined as a result of modeling.

PACS: 87.55.N–; 87.53.Bn; 28.20.Fc

## ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является оценка радиационной обстановки, создающейся при работе станции прикладных исследований для облучения микросхем высокоэнергетическими ионами ИСКРА (испытательной станции компонентов радиоэлектронной аппаратуры) и станции для радиобиологических исследований СИМБО (станции исследований медико-биологических объектов). Данные прикладные каналы базируются на выводе пучков из нуклотрона в 205-й корпус (эксперимент BM@N). Прикладные каналы будут размещены после вертикального магнита СП-12А в измерительном павильоне. Подробному описанию каналов и станций посвящены публикации [1, 2].

Пучок выводится из нуклотрона с энергией ионов от 150 МэВ/нуклон до 1 ГэВ/нуклон, расположенного ниже уровня каналов прикладных исследований. Затем пучок отклоняется в горизонтальной плоскости электростатическим септумом, далее двумя магнитами Ламбертсона в вертикальной плоскости в направлении вверх. По пути движения пучка осуществляется его подстройка в вертикальной плоскости вертикальным корректирующим магнитом ВКМ1. Вертикальный дипольный магнит СП-12А переводит пучок обратно в горизонтальную плоскость на уровень каналов прикладных исследований в измерительном павильоне корпуса № 1. Далее пучок транспортируется либо по прямой в корпус № 205, либо за счет поворотного магнита СП-94 осуществляется отклонение пучка в направлении новых магнитных каналов к станциям СИМБО или ИСКРА.

В настоящей работе детально описывается методика моделирования методом Монте-Карло, направленного на прогнозирование радиационной обстановки при работе магнитных каналов и станций, при работе на выведенных пучках. Приводятся и обсуждаются результаты, полученные с помощью моделирования. Эти данные позволили определить предельные значения интенсивностей выведенных пучков, при которых работа на станциях в рассматриваемых режимах является безопасной для персонала и соблюдаются нормы радиационной безопасности за пределами территории комплекса [3].

Моделирование проводилось на основании технического задания (ТЗ) на проект обоснования радиационной безопасности станций и каналов прикладных исследований в измерительном павильоне корпуса № 1 ЛФВЭ от 2023 г. и сопроводительных материалов: чертежей, 3D-моделей и других предоставленных уточняющих данных, полученных от сотрудников ЛФВЭ ОИЯИ.

## 1. ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки радиационной обстановки, создающейся при работе каналов транспортировки пучка и станций прикладных исследований ИСКРА и СИМБО, было проведено моделирование методом Монте-Карло. Для моделирования транспорта частиц и связанных физических процессов в веществе применялась программа FLUKA версии 4.3.4 (ЦЕРН) [4, 5]. Для решения поставленной задачи моделируются независимые истории взаимодействия с веществом выведенных для облучения ионов и потерянных на этапе транспортировки в каналах частиц.

Для моделирования физических процессов в веществе в программе FLUKA есть предустановленные наборы физических моделей, для расчетов применялся набор PRECISION. В данном наборе наряду с другими частицами осуществляется также транспорт электронов, позитронов и фотонов, активирован транспорт тяжелых фрагментов.

Для точного описания взаимодействия нейтронов с энергией ниже 20 МэВ используются нейтронные сечения и законы рассеяния из библиотеки оцененных нейтронных данных JEFF версии 3.3 от 2017 г. для всех используемых в геометрии материалов.

Установлены пороги минимальных энергий транспорта частиц: нейтронов — 0,01 мэВ, гамма-частиц, электронов и позитронов — 1 МэВ, всех остальных частиц — 100 кэВ. Это означает, что все образовавшиеся частицы со значениями энергий, меньших заданного порога, не транспортируются, а вся их энергия считается выделенной в месте рождения. Кроме того, установлен порог для дельта-электронов — 1 МэВ. Установленные пороги являются вынужденным компромиссом между производительностью и точностью расчетов.

При эксплуатации станций СИМБО и ИСКРА предполагаются различные режимы работы, отличающиеся по времени работы, зоне облучения, используемым типам и энергиям ионов, а также режимам вывода пучка: без сканирования и со сканированием, с применением специальных магнитов.

На основании предоставленного ТЗ и уточняющих данных определены режимы работы станций, для которых производился расчет. Для каждого режима работы были определены параметры пучка (тип ионов и энергия, локализация, направление распространения, темпы потерь), что детально описано в п. 1.3.

Для всех режимов работы станций задавалась единая 3D-геометрия каналов транспортировки пучка измерительного павильона согласно ТЗ, имеющимся чертежам и 3D-моделям, но с некоторыми допущениями, подробное описание воспроизводимой геометрии приведено в п. 1.1. Через заданную геометрию осуществлялся транспорт частиц в соответствии с рассматриваемыми режимами работы станций и темпами потерь пучка ионов при транспортировке и выводе пучка.

**1.1. Геометрия.** ***1.1.1. Общее описание воспроизводимой геометрии.*** В воссоздаваемой для расчетов геометрии учитывались внешние стены корпуса № 1, корпуса № 205, стены измерительного павильона с оконными проемами. В крыше измерительного павильона учтены настилы из железобетонной плиты толщиной 70 мм и слои выравнивающей цементно-песчаной стяжки толщиной 20 мм. Итоговая толщина крыши составляет 140 мм железобетона и 40 мм стяжки. Вне зданий учитывалась только поверхность земли (толщиной 1 м) и воздух на расстоянии 1 км во всех направлениях от центра корпуса № 1 (для учета нейтронов skyshine). Частицы, попадающие за стенки корпуса № 205, считаются выбывшими из моделирования и не транспортируются далее. Учитываются лишь частицы, которые рассеиваются на стенах и близлежащей биологической защите корпуса № 205. Общая геометрия снаружи выглядит, как показано на рис. 1.

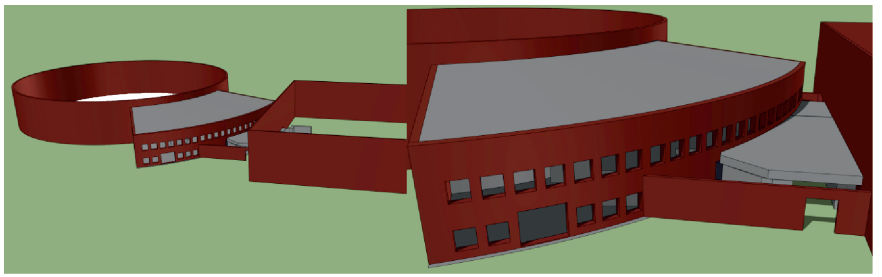

Рис. 1. Используемая в расчетах 3D-геометрия: общий вид (слева); вид на здание измерительного павильона с крышей, оконными и дверными проемами (справа)

Внутри измерительного павильона располагаются станции ИСКРА и СИМБО, а также каналы транспортировки пучка, представленные магнитами и вакуумными камерами. Каналы транспортировки и станции окружены биологической защитой. На обоих каналах планируется располагать различное диагностическое оборудование (системы неразрушающего контроля положения пучка), вакуумные затворы, вакуумные насосы. Данное оборудование в расчетах не учитывалось. Конечные по пучку фланцы вакуумных ионопроводов в реальности закрываются окнами из фольги титана толщиной 50 мкм, в расчетах фольга также не учитывалась. Высота пучка над уровнем бетонного пола измерительного павильона составляет 2500 мм, над уровнем фальшпола — 1500 мм.

При моделировании задавалась область подвального помещения (далее именуется как «галерея») по предоставленной схеме, приведенной на рис. 2, слева. На рис. 2, справа показана область подвального помещения в вертикальном разрезе по ловушке ИСКРА, воссозданная для

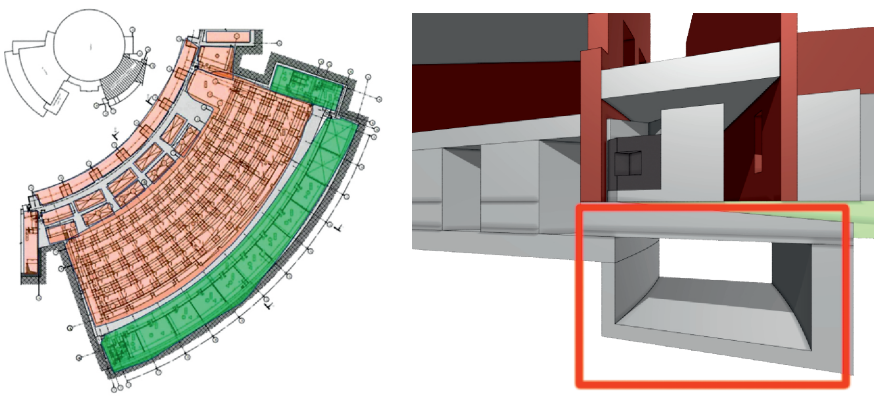

Рис. 2. Схема расположения подвального помещения с установленным зонированием (слева) и вертикальный разрез с обозначением подвального помещения в воссоздаваемой для расчетов геометрии (справа)

проведения расчетов. Данная область не была детализирована и содержит только верхнее перекрытие и стены, без внутреннего наполнения.

Биологическая защита была детально учтена в геометрии, считается, что она сплошная, без учета зазоров между блоками, из которых она складывается. Тем не менее в биологической защите домиков экспериментаторов и напротив них были детально учтены «проходки» — места прокладки кабеля, которые выкладываются в виде лабиринта (рис. 3). «Проходки» в модели не имеют заполнения. 3D-модель перекрытий биологической защиты приведена на рис. 4. На рис. 5 показан вид на защиту сверху в измерительном павильоне (слева) и пристройке (справа).




Рис. 3. Расположение «проходок» в воссозданной для расчетов геометрии

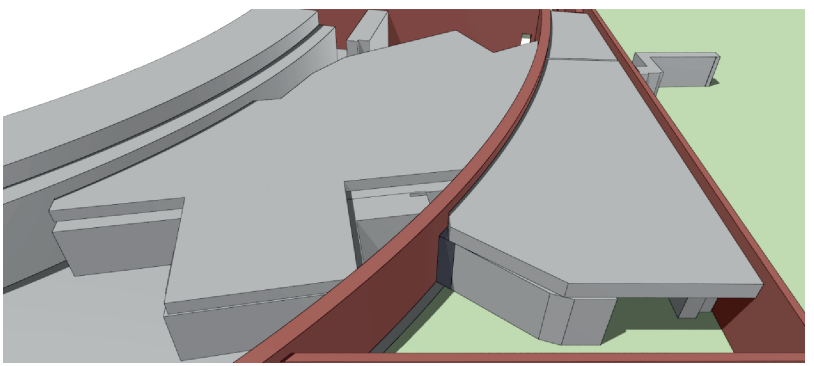

Рис. 4. 3D-модель используемой в расчетах геометрии перекрытий биологической защиты

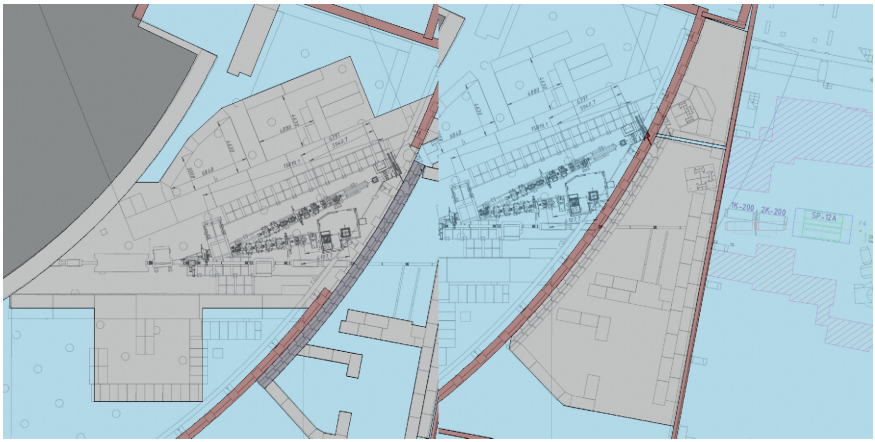

Рис. 5. Используемая в расчетах геометрия перекрытий биологической защиты: вид сверху на перекрытие в измерительном павильоне (слева); вид сверху на перекрытие в пристройке между измерительным павильоном и корпусом № 205 (справа) с полупрозрачным наложением чертежей

В следующих подпунктах приводится описание геометрии каналов и станций СИМБО и ИСКРА, принятой для расчетов.

***1.1.2. Геометрия канала транспортировки пучка и станции СИМБО.*** Магнитная система транспортировки пучка радиобиологического канала станции СИМБО располагается за вертикальным дипольным магнитом СП-12А (обозначается далее как SP12A) и состоит из дипольного магнита СП-94 (M11), четырех квадрупольных линз (Q11–Q14) и двух сканирующих магнитов (DRSM1 и DRSM2). Используемая геометрия канала для прикладных исследований приведена на рис. 6 в разрезе по плоскости пучка (для визуализации элементы сверху от плоскости сечения отключены).

На станциях СИМБО и ИСКРА используются аналогичные магниты, их 3D-геометрия приведена на рис. 7 и 8. Модели магнитов были воссозданы по чертежам, в них учтены ярмо и обмотки.

Станция СИМБО представляет собой климатический бокс с размещенным внутри диагностическим оборудованием и позиционером (креслом) для фиксации приматов или других различных биологических объектов в качестве мишени. На входе и выходе климатического бокса на оси пучка располагаются окна, выполненные из майлара толщиной 20 мкм. Для улучшения параметров пучка на станции СИМБО планируется применять стальной коллиматор, который представляет собой параллелепипед длиной вдоль оси пучка ионов 50 см, высотой 20 см и шириной 20 см. В коллиматоре предусматривается отверстие диаметром 50 мм, ориентированное вдоль оси пучка ионов. Конструкция кол-

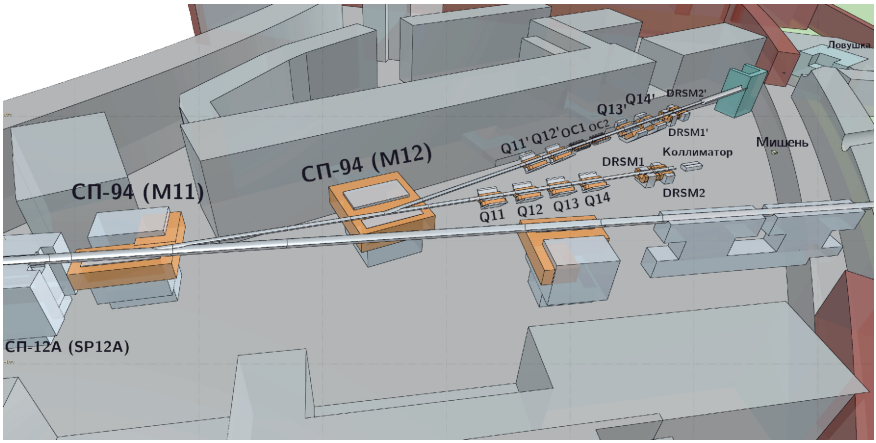


Рис. 6. Используемая в расчетах геометрия каналов транспортировки пучка СИМБО и ИСКРА (в разрезе по плоскости пучка, с отключением визуализации верхней части геометрии)

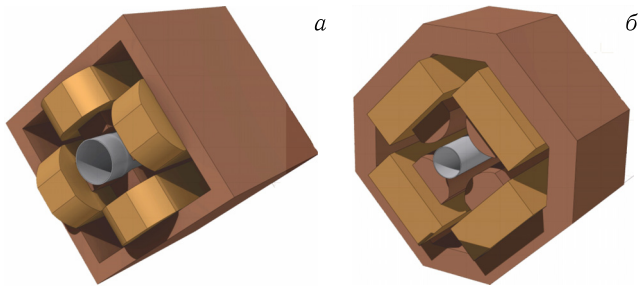


Рис. 7. Используемая в расчетах геометрия магнитов на станциях СИМБО и ИСКРА: *а*) квадрупольные линзы Q11–Q14 и Q11′, Q12′; *б*) квадрупольные линзы Q13′, Q14′

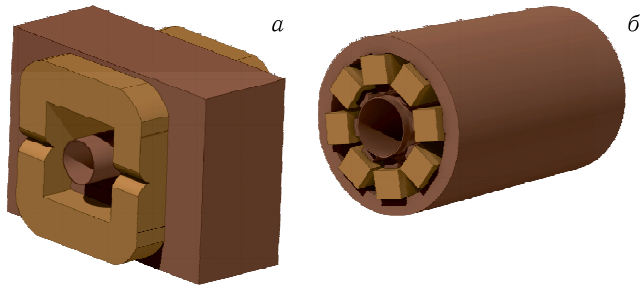


Рис. 8. Используемая в расчетах геометрия магнитов на станциях СИМБО и ИСКРА: *а*) сканирующие магниты; *б*) октупольные магниты OC1 и OC2

лиматора позволяет варьировать проходной диаметр со значениями от 10 до 50 мм и шагом 10 мм с помощью вставок во внутреннее отверстие набора стальных труб без зазоров. Коллиматор смонтирован на ферме, позволяющей его накатывать соосно на линию пучка по рельсам и откатывать в случае необходимости. Вакуумный ионопровод заканчивается непосредственно у коллиматора.

Внутри климатического бокса будут располагаться объекты облучения. Для имитации биологического объекта (лабораторных животных, головы примата, тонких мишеней) в расчете задается цилиндр из тканеэквивалентного материала («Soft Tissue», ICRU) [6, с. 245], толщина по пучку при этом варьируется. Используются два типа мишеней, условно именуемые как «тонкая» (толщиной по пучку 2 см) и «толстая» (толщиной по пучку 10 см). Диаметр мишеней в обоих случаях составляет 10 см.

Набор диагностики пучка в климатическом боксе: файберный сцинтилляционный детектор, стриповая ионизационная камера, наклонная ионизационная камера, тонкий сцинтилляционный спектрометр, тканеэквивалентная миниатюрная ионизационная камера, алмазный детектор — моделируется водным эквивалентом толщиной 24 мм по пучку и 80 мм по поперечным направлениям. Данный водный параллелепипед размещается в модели на расстоянии 150 мм от внутренней поверхности стенки климатической кабины.

Для поглощения пучка ионов после прохождения станции СИМБО используется специально разработанная ловушка, которая была учтена при моделировании (рис. 9).

Таким образом, в воссоздаваемой для расчетов геометрии (см. рис. 6) были учтены магнитные элементы канала транспортировки пучка, коллиматор, биологическая мишень («толстая» или «тонкая»), водный экви-

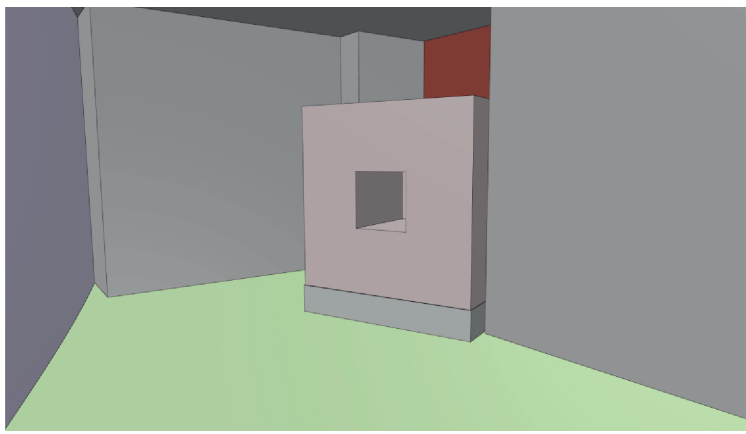

Рис. 9. Используемая в расчетах геометрия ловушки за станцией СИМБО

валент диагностики пучка станции СИМБО, ловушка и биологическая защита. При этом в геометрии был допущен ряд упрощений, которые необходимы для ускорения проводимых расчетов.

1. В каждом магните тракта детально учтены только обмотки и ярмо, без учета остальных элементов и поддерживающих ферм.

2. Материал фальшпола не учитывается.

3. Фольга в разрывах ионопровода не учитывается.

4. Игнорируется материал климатического бокса с размещенным внутри диагностическим оборудованием (которое имитируется водным эквивалентом только для настроечного режима, см. п. 1.3.6) и позиционером для фиксации приматов.

5. Не учитывается ферма коллиматора.

6. Ловушка задается как сплошная, но возможные пустоты, возникающие из-за зазоров при сборке, учитываются при задании материала ловушки как смеси стали и воздуха по объему с меньшей плотностью (см. п. 1.2).

***1.1.3. Геометрия канала транспортировки пучка и станции ИСКРА.*** Магнитная система транспортировки пучка канала для облучения микросхем станции ИСКРА располагается за вертикальным дипольным магнитом СП-12А и состоит из двух дипольных магнитов СП-94 (М11 и М12), четырех квадрупольных линз (Q11′–Q14′), двух октупольных магнитов (ОС1 и ОС2) и двух сканирующих магнитов (DRSM1′ и DRSM2′). Воспроизводимая для расчетов 3D-геометрия канала транспортировки пучка к станции ИСКРА показана на рис. 6.

Станция ИСКРА (рис. 10) обладает диагностическим оборудованием и системой позиционирования образцов облучения на оси выведенного пучка. Перед ослабителем энергии (деградером) имеется разрыв ионо-

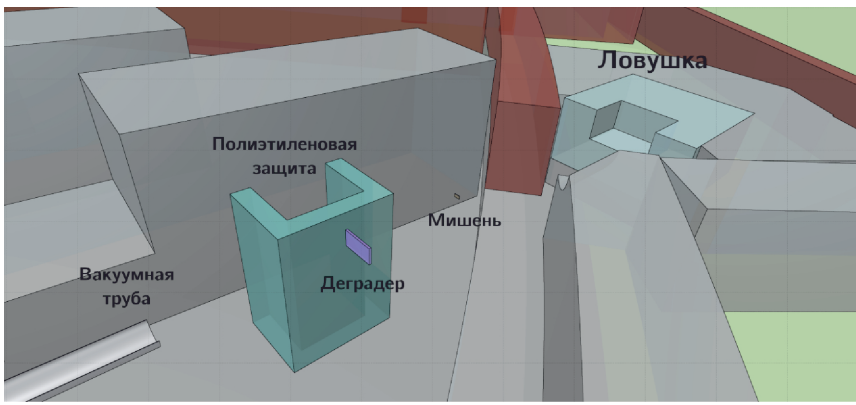


Рис. 10. Используемая в расчетах геометрия станции ИСКРА (в разрезе по плоскости пучка, с отключением визуализации верхней части геометрии)

провода, на выходе ионопровода в реальности устанавливается фольга из титана толщиной 50 мкм. На рабочем месте рядом с областью облучения размещается П-образная стойка с электронной аппаратурой и борированной полиэтиленовой защитой. Деградер представляет собой набор подвижных пластин из поликарбоната суммарной толщиной $\sim 120$ мм (габаритный размер корпуса деградера 308 мм).

За деградером располагается мишень (микросхема). В расчетах используется модель инкапсулированной микросхемы, состоящей из никелевой крышки (толщиной 0,3 мм, размерами $40 \times 40$ мм), кремниевого микрочипа (толщиной 0,5 мм, размерами $20 \times 20$ мм), расположенного в керамической полости (толщина по краям от микрочипа 1,5 мм, толщина за микрочипом 1 мм, размерами $40 \times 40$ мм), слоя стеклотекстолита (толщиной 2 мм, размерами $60 \times 60$ мм). Эскизный чертеж микросхемы и воссозданная 3D-геометрия модели приведены на рис. 11.

Для поглощения пучка ионов после станции ИСКРА будет задействована специально разработанная ловушка (см. рис. 10), которая также учтена в геометрии модели для расчетов.

Для защиты аппаратуры на станции ИСКРА планируется использовать радиационно защищенную стойку. Стойка защищена с трех сторон сэндвич-панелями (алюминий 2 мм – свинец 3 мм – алюминий 2 мм) суммарной толщиной 7 мм и стенами из 5%-го борированного полиэтилена (NEUTROSTOP, KOPOS KOLIN, Чехия). Дополнительно предусматривается защита сверху (крышка) борированным полиэтиленом толщиной 6–8 см. Общие габаритные размеры стойки с защитой — $1130 \times 800 \times 2330$ мм. Стойка в расчетах представляет собой каркас с сэндвич-панелями (алюминий–свинец–алюминий), обложенный борированным полиэтиленом, без учета крышки.

Таким образом, в воссоздаваемой для расчетов геометрии были учтены магнитные элементы канала транспортировки пучка, деградер, мишень (микросхема), стойка с аппаратурой, ловушка и биологическая

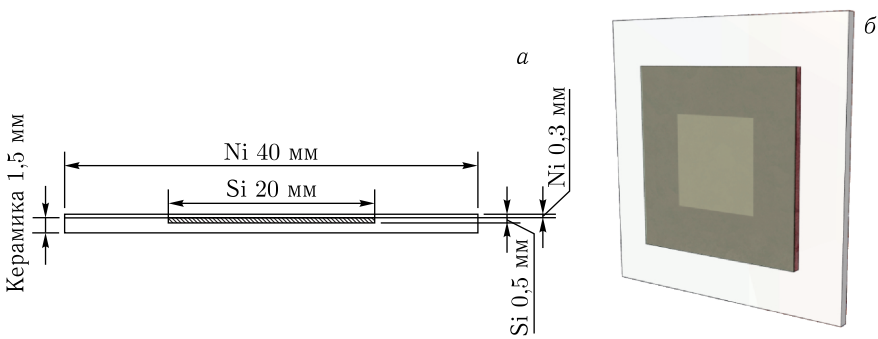


Рис. 11. Эскизный чертеж используемой в расчетах модели микросхемы (*а*) и 3D-визуализация используемой в расчетах модели (*б*)

защита. В геометрии был допущен ряд упрощений, которые необходимы для ускорения проводимых расчетов:

1) в магнитах детально учтены только обмотки и ярмо, без остальных элементов и поддерживающих ферм;

2) материал фальшпола не учитывается;

3) фольга в разрывах ионопровода не учитывается;

4) игнорируются диагностическое оборудование и система позиционирования образцов;

5) деградер представлен параллелепипедом из поликарбоната без учета корпуса, толщина варьируется в зависимости от используемых ионов и энергий для локализации пика Брэгга в микрочипе;

6) ловушка задается как сплошная, но возможные пустоты, возникающие из-за зазоров при сборке, учитываются при задании материала ловушки как смеси стали и воздуха по объему (см. п. 1.2).

Все используемые в воссоздаваемой геометрии для расчетов материалы будут представлены в следующем пункте.

**1.2. Материалы.** Составы для материалов используемой в расчетах геометрии были подобраны на основании имеющейся информации о реальной обстановке. Данные по химическому составу и плотностям соответствующих материалов взяты из специализированного сборника [6], стандартов (ГОСТ, ISO, NIST) и рекомендаций ICRP/ICRU.

***1.2.1. Внутренние и наружные материалы измерительного павильона.*** Вокруг корпуса задается земляной покров толщиной 1 м со средней плотностью земли 1,52 г/см$^3$. Воздух внутри и снаружи корпуса влажный, задается как смесь сухого воздуха 98 % и водяного пара 2 % по массе. Состав стен корпусов — силикатный кирпич.

Каналы транспортировки окружены биологической защитой. Защита представлена железобетонными конструкциями, плотность которых может варьироваться от 2,3 до 2,5 г/см$^3$. Для более консервативной оценки в расчетах все конструкции из бетона задаются как обычный бетон плотностью 2,3 г/см$^3$. Фундамент и перекрытия, а также настилы железобетонной плиты в крыше также задаются как обычный бетон. Стена биологической защиты, примыкающая к стене измерительного павильона, задана как особо тяжелый бетон плотностью 4,4 г/см$^3$.

Материал ловушек является гетерогенным: смесь стали марки Ст3 и воздуха в соотношении по объему 85 и 15 % соответственно. Таким образом, учтено влияние зазоров при сборке ловушек в допущении, что зазоры распределены по всему объему равновероятно.

***1.2.2. Материалы элементов транспортных каналов.*** Материал вакуумных труб для трактов транспортировки пучка — нержавеющая сталь марки AISI 316 (российский аналог — 08Х17Н13М2). Материал заполнения внутри — абсолютный вакуум (без учета остаточного газа).

Ярмо для всех магнитов задается низкоуглеродистой сталью AISI 1008 (США) плотностью 7,8 г/см$^3$. В геометрии использованы два различных типа обмоток в зависимости от типа магнитов: для квадрупольных линз Q11–Q14, Q11′, Q12′ и сканирующих магнитов — медные с учетом воды для охлаждения, для линз Q13′, Q14′, октупольных магнитов и магнитов СП-94 — плоский провод из меди М1 (без охлаждения).

**1.3. Режимы работы станций и моделирование потерь пучка.** Общая радиационная обстановка обуславливается мгновенным (проникающим) излучением, возникающим во время непосредственной работы станций на выведенном пучке, а также наведенной радиоактивностью, обусловленной активацией конструкционных материалов деталей и узлов каналов транспортировки пучка, коллиматора, ловушек, материала пола, потолка, стен и воздуха внутри биологической защиты. Первый тип излучения обусловлен каскадом, генерируемым пучком первичных частиц (ионов). Для определения радиационных условий необходимо знать локализацию потерь, параметры пучка (положение, энергию, разброс по энергии, расхождение пучка и т. д.) и правильную нормировку результатов расчета (интенсивность, характеризующую темпы потерь пучка). Для определения остаточной радиации необходимо знать профиль облучения, под которым подразумевается время работы на выведенном пучке, и интенсивности пучка за это время, также необходимо знать время простоя ускорителя. В настоящей работе представлены результаты только для проникающего излучения, возникающего при работе станций без рассмотрения вопросов активации.

Расчеты производились для различных режимов работы станций, отличающихся локализацией потерь и типом выведенного пучка.

1. Для станции ИСКРА:

• вывод пучка без сканирования для режима облучения микросхем в пике Брэгга (290 ч/год, 58 % от суммарного времени работы станции);

• вывод пучка (со сканированием и без) для режима облучения микросхем напролет (180 ч/год, 36 % от суммарного времени работы станции).

2. Для станции СИМБО:

• вывод пучка (со сканированием и без) для режима облучения напролет «толстой» биологической мишени с применением коллиматора (30 ч/год без сканирования, 180 ч/год со сканированием, всего 210 ч/год, 70 % от суммарного времени работы станции);

• вывод пучка (со сканированием и без) для режима облучения напролет «тонкой» биологической мишени без использования коллиматора (60 ч/год, 20 % от суммарного времени работы станции);

• вывод пучка (со сканированием и без) в настроечном режиме (30 ч/год, 10 % от суммарного времени работы станции).

Станция ИСКРА также будет работать в настроечном режиме, в котором время работы составит 30 ч/год, 6 % от суммарного времени работы станции, но данный режим работы при моделировании не рассматривался.

Для каждого из перечисленных выше режимов был произведен независимый расчет в единой геометрии, описанной в п. 1.1. При каждом режиме работы происходят потери в каналах транспортировки пучка до станций, поэтому также были произведены дополнительные расчеты для учета потерь на элементах тракта транспортировки пучка (см. п. 1.3.1). В зависимости от рассматриваемого в моделировании режима работы проводилась корректировка общей геометрии: отключались элементы, расположенные на пучке (деградер, коллиматор, мишени, диагностика), менялась форма и диаметр отверстия для коллиматора, тип пучка также задавался различным образом, поэтому нормировка результатов также была разной. Параметры пучка и производимая корректировка геометрии для каждого режима приводятся в последующих подпунктах.

В табл. 1 и 2 приведены используемые частицы, энергии и условные обозначения предельных интенсивностей для каждого режима на станциях ИСКРА (индекс I) и СИМБО (индекс S) соответственно. Нормировка результатов проводится в предположении, что период следования импульсов ускорителя $T$ всегда составляет 10 с и за каждый такой период отпускается одинаковое число частиц за время $\tau = 5$ с.

*Таблица* 1. **Режимы работы на станции ИСКРА**

| № | Режим работы | Параметры пучка (размеры, расхождение и т. д.) | Ион | Энергия, МэВ/нуклон | Интенсивность, ион/импульс |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Облучение микросхемы в пике Брэгга без сканирования (с деградером) | Приводятся в п. 1.3.2 | $^{209}Bi^{83+}$ | 179 | $I_{I1/Bi}$ |
| | | | $^{40}Ar^{18+}$ | 170 | $I_{I1/Ar}$ |
| 2 | Облучение микросхемы напролет без сканирования | Приводятся в п. 1.3.3 | $^{209}Bi^{83+}$ | 350 | $I_{I2/Bi}$ |
| | | | $^{40}Ar^{18+}$ | 430 | $I_{I2/Ar}$ |
| 3 | Облучение микросхемы напролет со сканированием по спирали | | $^{209}Bi^{83+}$ | 350 | $I_{I3/Bi}$ |
| | | | $^{40}Ar^{18+}$ | 430 | $I_{I3/Ar}$ |

***1.3.1. Методика задания потерь на элементах трактов транспортировки пучка.*** Для учета потерь, возникающих при транспортировке пучка, для каждого режима работы производился дополнительный расчет. В общем случае потери на трактах транспортировки пучка про-

*Таблица* 2. **Режимы работы на станции СИМБО**

| № | Режим работы | Параметры пучка (размеры, расхождение и т. д.) | Ион | Энергия, МэВ/нуклон | Интенсивность, ион/импульс |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Облучение напролет без сканирования (с коллиматором) | Приводятся в п. 1.3.4 | $^{84}Kr^{36+}$ | 800 | $I_{S1/Kr}$ |
| | | | $^{12}C^{6+}$ | 1110 | $I_{S1/C}$ |
| 2 | Облучение напролет со сканированием по спирали (с коллиматором) | | $^{84}Kr^{36+}$ | 800 | $I_{S2/Kr}$ |
| | | | $^{12}C^{6+}$ | 1110 | $I_{S2/C}$ |
| 3 | Облучение напролет со сканированием по спирали (без коллиматора) | Приводятся в п. 1.3.5 | $^{84}Kr^{36+}$ | 800 | $I_{S3/Kr}$ |
| | | | $^{12}C^{6+}$ | 1110 | $I_{S3/C}$ |
| 4 | Настроечный режим без сканирования (без коллиматора) | Приводятся в п. 1.3.6 | $^{84}Kr^{36+}$ | 800 | $I_{S4/Kr}$ |
| | | | $^{12}C^{6+}$ | 1110 | $I_{S4/C}$ |
| 5 | Настроечный режим со сканированием по спирали (без коллиматора) | | $^{84}Kr^{36+}$ | 800 | $I_{S5/Kr}$ |
| | | | $^{12}C^{6+}$ | 1110 | $I_{S5/C}$ |

исходят как вдоль магнитных элементов, так и на участках между ними. Далее описывается подход к моделированию данных потерь, который использовался при расчетах.

Для моделирования потерь на каждом из магнитов и на участках между ними задаются положения источников $S(x, y, z)$ и направление движения $\mathbf{\Omega}(\theta, \varphi)$ частиц из источника следующим образом.

1. Выбирается начальное положение частицы $S(x, y, z)$ (источник) вблизи стенок вакуумной камеры радиусом $R$ по всему радиусу $r_S = R - \varepsilon$, где $\varepsilon$ сколь угодно малое число, $r_S$ — радиус положения источников внутри камеры. Источники располагаются на протяжении всего участка потерь, охватывающего камеру (рис. 12). Положения частиц устанавливаются выборкой из равномерного распределения, поэтому начальное положение частиц распределено равновероятно по стенкам камеры на протяжении всей длины участка, на котором происходят потери. В общем случае начальное положение $S$ можно также задавать более детально, если известно реальное распределение потерь.

2. Из положения $S(x, y, z)$ частица испускается в направлении $\mathbf{\Omega}(\theta, \varphi)$. Направление $\mathbf{\Omega}$ удобно определить в сферической системе

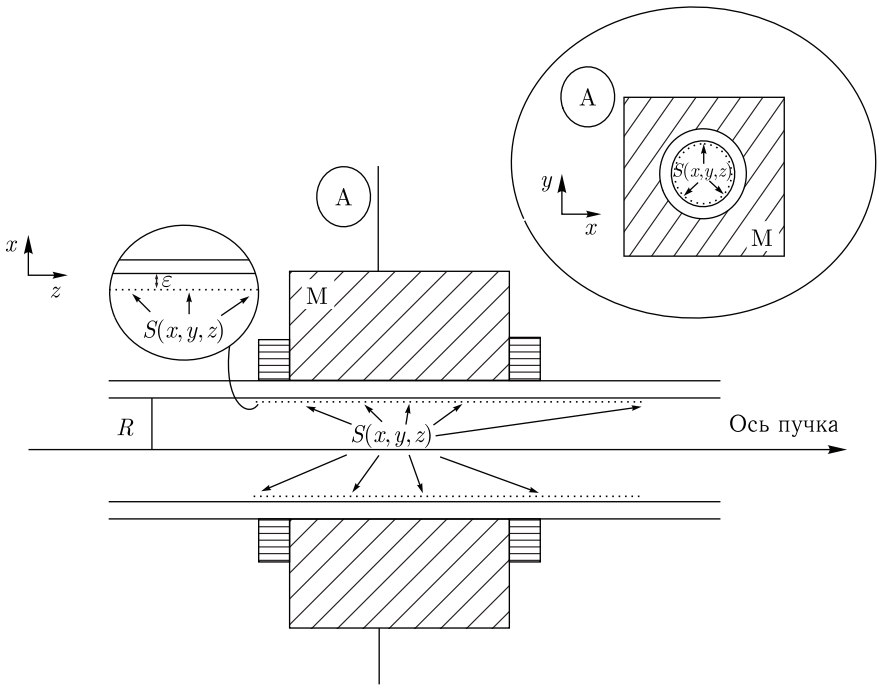


Рис. 12. Схема задания положений источников частиц $S(x, y, z)$ для моделирования потерь при транспортировке пучка

координат через угол $\theta$ между осью $z$ и вектором $\mathbf{\Omega}$ и через угол $\varphi$ между осью $x$ и проекцией $\mathbf{\Omega}$ на плоскость $xy$. При этом угол $\varphi$ зависит от положения частицы $S$ и меняется в пределах от $-\pi/2$ до $\pi/2$ от направления нормали $\mathbf{n}$ к окружности в точке положения частицы (рис. 13). В плоскости $xy$ направление вектора $\mathbf{n}$ можно охарактеризовать углом $\alpha$, тогда угол $\varphi$ меняется в пределах $\alpha - \pi/2 \leqslant \varphi \leqslant \alpha + \pi/2$. Значения углов $\theta$ и $\varphi$ задаются выборкой по распределениям: для $\theta$ — усеченным нормальным распределением с $\mu = \pi/180$, $\sigma = (\pi/180)\,(1/6)$ и границами $a = 0$, $b = \pi/180$; углы $\theta$, таким образом, могут иметь значения от 0 до 1 (не включая) градусов с нормальным распределением в этом интервале; для $\varphi$ — равномерное распределение от $-\pi/2$ до $\pi/2$. В общем случае углы можно также задавать более детально при наличии информации о реальных распределениях.

Приведенным выше образом моделируются потери на линиях транспортировки пучка до станций. Выбор участка, захватывающего магнит и часть вакуумной камеры до следующего магнита, в котором задаются потери, определяется выборкой по соответствующей функции вероятности, отвечающей за относительный вклад потерь на конкретном участке

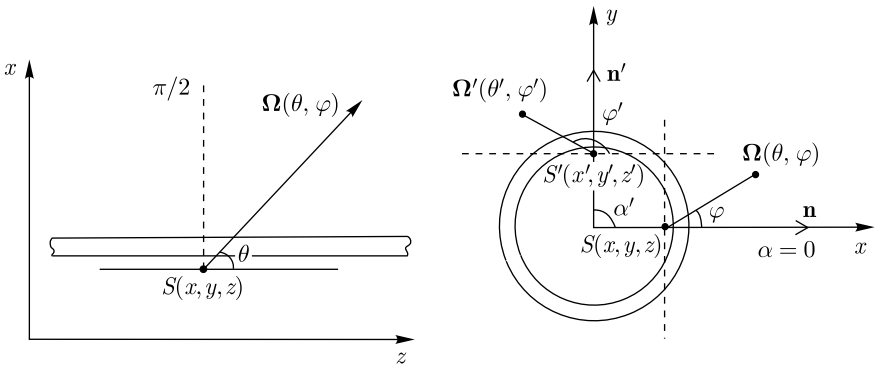


Рис. 13. Схемы задания направления движения частиц $\mathbf{\Omega}(\theta, \varphi)$ из источников для моделирования потерь при транспортировке пучка

в общие потери на элементах тракта транспортировки пучка. На рис. 14 показано расположение участков, на которых задавались потери описанным выше образом для ИСКРА (11 участков) и СИМБО (8 участков) соответственно.

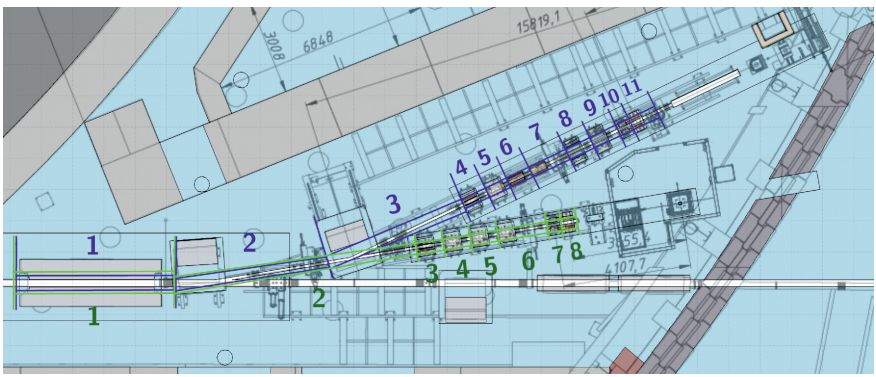


Рис. 14 (цветной в электронной версии). Схема обозначения локализации потерь при транспортировке пучка: 11 участков до станции ИСКРА (выделены синим цветом), 8 участков до станции СИМБО (выделены зеленым)

Таким образом, на станции ИСКРА потери происходят на 11 участках, захватывающих магниты SP12A, M11, M12, Q11′, Q12′, OC1, OC2, Q13′, Q14′, DRSM1′, DRSM2′ (см. рис. 6) в соотношении, показанном на рис. 15. Потери при транспортировке пучка до станции СИМБО задаются аналогичным образом, но происходят на 8 участках, захватывающих магниты SP12A, M11, Q11, Q12, Q13, Q14, DRSM1, DRSM2 в соотношении, показанном на рис. 16. Выборкой из данных функций вероятности обеспечивается правильный вклад в потери от каждого участ-

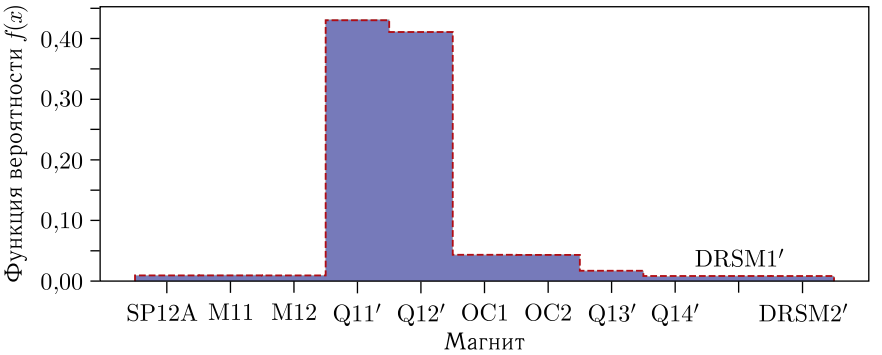


Рис. 15. Функция вероятности темпов потерь на участках (охватывающих обозначенные магниты) тракта транспортировки пучка к станции ИСКРА. Штриховой линией показана используемая при моделировании функция, гистограмма — выборка из распределения на 100 000 событий

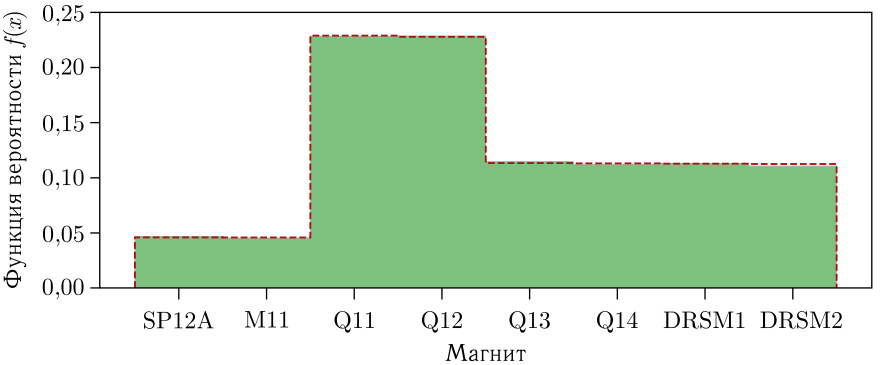


Рис. 16. Функция вероятности темпов потерь на участках (охватывающих обозначенные магниты) тракта транспортировки пучка к станции СИМБО. Штриховой линией показана используемая при моделировании функция, гистограмма — выборка из распределения на 100 000 событий

ка, функции составлены на основании расчетов огибающих пучка при транспортировке в магнитах. Нормировка происходит по интегральным потерям на всех участках с расположенными магнитными элементами каналов.

Принималось, что интегральные потери на всех участках зависят от интенсивности выведенного пучка следующим образом:

$$\begin{aligned} I_{\text{СИМБО}} &= 0{,}0222 I_{\text{out}}, \\ I_{\text{ИСКРА}} &= 0{,}116 I_{\text{out}}. \end{aligned} \tag{1}$$

То есть суммарные потери на тракте СИМБО для всех 8 участков составляют 2,22 %, а для всех 11 участков тракта ИСКРА — 11,6 % от интенсивности выведенного пучка $I_{\text{out}}$ в зависимости от режима работы, как приведено в табл. 1 и 2.

***1.3.2. Облучение микросхемы в пике Брэгга без сканирования на станции ИСКРА.*** Потери в данном режиме работы обусловлены взаимодействием с окружением выведенного пучка для облучения микросхемы на станции ИСКРА (рис. 17). Для моделирования пучка в режиме без сканирования было принято, что разброс по поперечным координатам $X$ и $Y$ определяется нормальным распределением вероятностей с величиной FWHM = 60 мм для обоих направлений. Пучок имеет расхождение по углу 5,22 мрад, таким образом, FWHM на мишени составит 73 мм. Стартовая позиция пучка при моделировании находится за сканирующими магнитами непосредственно за фланцем тракта транспортировки пучка, как это показано на рис. 17. На выходе из ионопровода пучок движется по воздуху до деградера. Толщина деградера в расчетах варьируется в зависимости от типа иона и энергии. Расчеты проводились для пучков $^{209}Bi^{83+}$ с энергией 179 МэВ/нуклон и $^{40}Ar^{18+}$ с энергией 170 МэВ/нуклон при толщине деградера 2003 мкм в первом случае и 16 719 мкм во втором. Разброс по энергии не учитывается (пучок моноэнергетический). Энергия ионов предварительно подбиралась на основании расчетов по программе ATIMA [7] для воссозданной геометрии таким образом, чтобы пик Брэгга был локализован в микрочипе. После прохождения деградера пучок через слой воздуха попадает на чип.

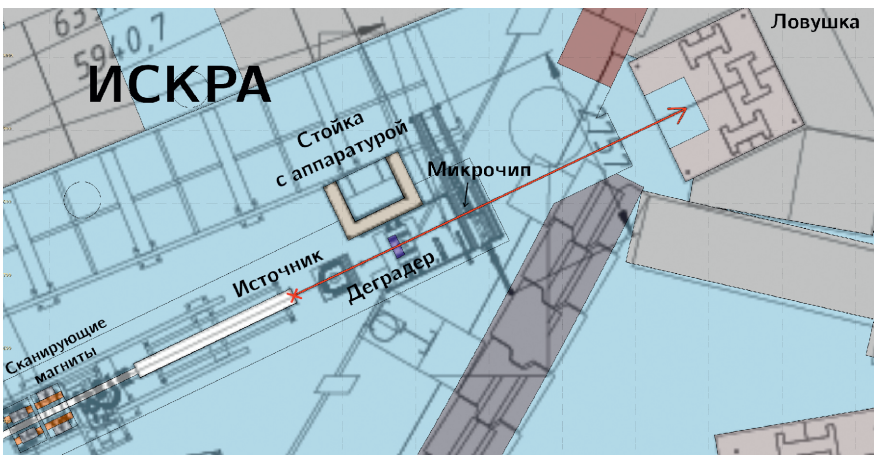


Рис. 17. Схема вывода пучка на станции ИСКРА для облучения микросхемы

Данный режим работы станции является основным, и планируется, что на данный режим приходится 58 % от общего времени работы станции (290 ч/год).

***1.3.3. Облучение микросхемы напролет на станции ИСКРА.*** Потери в данном режиме работы обусловлены взаимодействием с окружением выведенного пучка для облучения микросхемы на станции ИСКРА (см. рис. 17). В данном режиме используются два типа пучка: без сканирования и со сканированием. Главные отличия от режима согласно п. 1.3.2 — отсутствие деградера и большие энергии ионов.

Стартовая позиция и параметры пучка (разброс по поперечным координатам и расхождение) в режиме без сканирования задаются аналогично описанному в п. 1.3.2 способу. На выходе из ионопровода пучок движется по воздуху до мишени, материал деградера не учитывался (задавался как воздух). Для данного режима использовались пучки $^{209}Bi^{83+}$ с энергией 350 МэВ/нуклон и $^{40}Ar^{18+}$ с энергией 430 МэВ/нуклон. Разброс по энергии не учитывался (пучок моноэнергетический). После мишени пучок попадает на ловушку.

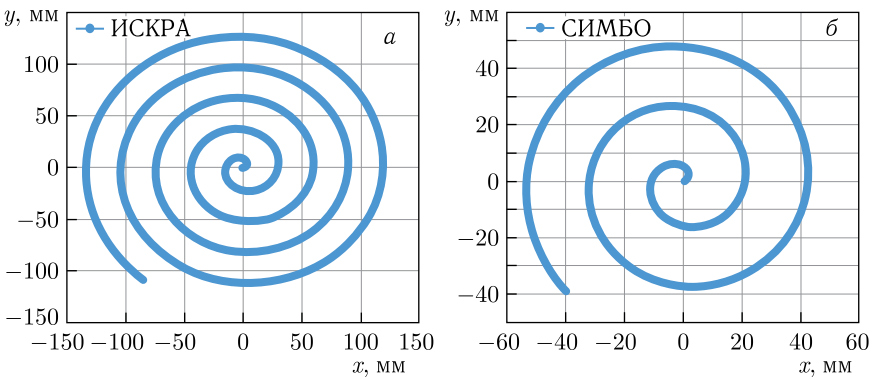


Рис. 18. Схема положений центра пучка на мишени при использовании сканирования по спирали на станциях ИСКРА (*а*) и СИМБО (*б*)

Для моделирования пучка в режиме сканирования частицы отклонялись из стартовой позиции таким образом, чтобы центр пучка на мишени находился в соответствии с траекторией на рис. 18, *а* (воспроизводится режим облучения по спирали). При этом разброс пучка по координатам в стартовой позиции определяется нормальным распределением по обоим поперечным направлениям с FWHM = 30 мм. Использовались ионы и энергии, аналогичные режиму без сканирования.

На данный режим облучения приходится 36 % времени работы станции (180 ч/год).

***1.3.4. Облучение напролет с коллиматором на станции СИМБО.*** Потери в данном режиме обусловлены главным образом взаимодействием пучка с коллиматором, мишенью и ловушкой при работе станции СИМБО. Используемые частицы и энергии пучка приведены в табл. 2. Пучок задается в соответствии с режимом: сканирование/без сканирования. Разброс по энергии не учитывается (пучок моноэнергетический).

При моделировании пучка в режиме без сканирования было принято, что разброс по поперечным координатам $X$ и $Y$ определяется нормальным распределением вероятностей с величиной $\mathrm{FWHM} = 20$ мм для обоих направлений. Расхождения по углам нет. Стартовая позиция пучка находится за сканирующими магнитами непосредственно за фланцем тракта транспортировки пучка станции СИМБО, как это показано на рис. 19. В режиме сканирования пучок задается с той же стартовой позиции. Отличие состоит в том, что в случае сканирования пучок отклоняется по углам таким образом, чтобы центр пучка описывал спираль, как это показано на рис. 18, *б*.

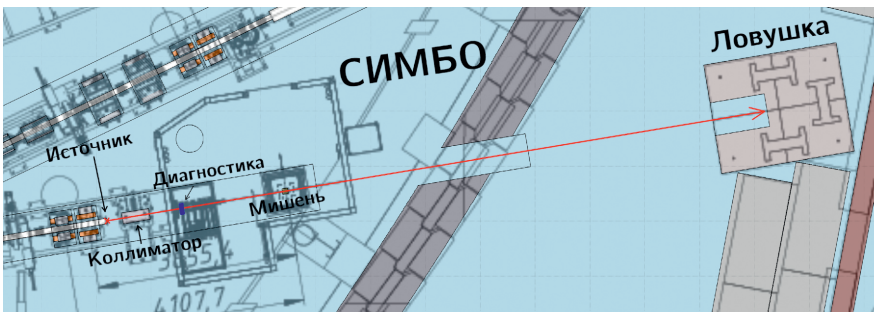


Рис. 19. Схема вывода пучка на станции СИМБО для облучения биологических объектов

Как в случае сканирования, так и без него после испускания частиц из стартовой позиции пучок проходит слой воздуха и попадает на коллиматор. Конфигурация коллиматора при этом меняется. В случае режима без сканирования диаметр отверстия коллиматора принимается равным 10 мм. В случае режима со сканированием используется коническая форма отверстия: диаметр на входе 30 мм, а на выходе 42 мм (рис. 20).

После коллиматора пучок попадает на «толстую» биологическую мишень — цилиндр толщиной по пучку 10 см и диаметром 10 см, которая имитирует облучаемый биологический объект (см. п. 1.1.2).

Частицы пучка, прошедшие мишень без взаимодействия, следуют по воздуху до установленной за станцией СИМБО ловушки.

Режим напролет без сканирования планируется использовать 30 ч/год, а режим напролет со сканированием — 180 ч/год, общее время работы — 210 ч/год (70 % от суммарного времени работы станции).

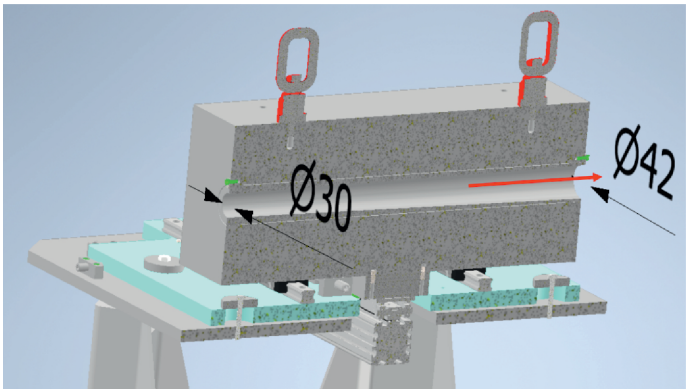


Рис. 20. 3D-визуализация конструкции коллиматора для случая режима со сканирующим пучком на СИМБО: входной диаметр 30 мм, выходной — 42 мм

***1.3.5. Облучение напролет со сканирующим пучком без коллиматора на станции СИМБО.*** Потери в данном режиме обусловлены взаимодействием сканирующего пучка с окружающим воздухом, мишенью и ловушкой при работе станции СИМБО, материал коллиматора при этом в расчете не учитывается (задается как воздух). Используемые частицы и энергии пучка приведены в табл. 2. Разброс по энергии не учитывается (пучок моноэнергетический).

Сканирующий пучок задается аналогично случаю с использованием коллиматора, описанному в п. 1.3.4, только в данном случае для разброса по координатам FWHM составляет 30 мм. Сканирующий пучок движется по воздуху до «тонкой» биологической мишени — цилиндра толщиной по пучку 2 см и диаметром 10 см, которая имитирует облучаемый биологический объект (см. п. 1.1.2).

Частицы пучка, прошедшие мишень без взаимодействия, следуют по воздуху до установленной за станцией СИМБО ловушки аналогично случаю с использованием коллиматора.

В данном режиме время работы станции за год составит 60 ч (20 % от суммарного времени работы станции).

***1.3.6. Настроечный режим на станции СИМБО.*** В данном режиме пучок задавался аналогично случаям со сканированием и без него, описанным выше, FWHM всегда был равен 30 мм, коллиматор и мишень не учитывались (задавались воздухом). На пучке размещалась только имитация набора диагностики пучка, которая представляет собой водный параллелепипед толщиной по пучку 24 мм и по поперечным направлениям 80 мм (см. п. 1.1.2).

Настроечный режим будет использоваться 30 ч/год (10 % от суммарного времени работы станции).

**1.4. Определение характеристик поля излучения.** Результатом расчетов для мгновенного излучения, возникающего во время непосредственной работы ускорителя, являются характеристики смешанного поля ионизирующего излучения: плотность потока частиц, эффективная и поглощенная дозы.

Пространственные распределения в расчете были получены путем разбиения некоторой интересующей области на ячейки фиксированного размера, в каждой такой ячейке считается средняя по объему плотность потока частиц, полученная оценкой по длине пробега (используется встроенный оценщик USRBIN в FLUKA).

Распределения эффективной дозы определяются сверткой спектров частиц в каждой ячейке с соответствующими коэффициентами конверсии флюенс – эффективная доза в соответствии с публикацией [8] и выбором максимальных значений из всех возможных геометрий облучения (AP, PA, RL, LR, ISO, ROT), что называется «наихудшей геометрией облучения» — WORST (Working Out Radiation Shielding Thicknesses), так как является самой консервативной из всех возможных геометрий, и рекомендуется для использования при расчетах защит.

Детектируются следующие частицы: гамма- и электроны с энергией от 1 МэВ до максимально возможной и нейтроны с энергиями от 0,01 мэВ до максимально возможной, для нейтронов дополнительно были выделены три группы энергий:

- первая группа, в которую входят: медленные (менее 1 эВ) и резонансные (от 1 эВ до 10 кэВ), итого энергии нейтронов по данной группе от 0,01 мэВ до 10 кэВ;
- вторая группа: промежуточные (от 10 кэВ до 1 МэВ) и быстрые (от 1 до 20 МэВ), итого энергии нейтронов от 10 кэВ до 20 МэВ;
- третья группа: быстрые и релятивистские (все нейтроны свыше 20 МэВ).

Все остальные частицы ($\alpha$, $\pi^{\pm}$, $\mu^{\pm}$) детектируются от энергии 100 кэВ.

Все результаты нормируются на одну испущенную частицу. Для получения реальных значений плотности потока частиц, поглощенных и эффективных доз результаты домножаются на соответствующие интенсивности, которые отражают темпы потерь пучка. Все обозначения интенсивностей для рассматриваемых режимов работы приведены в табл. 1 и 2.

Для расчетов радиационной обстановки были выделены области интереса, по которым определялись пространственные распределения характеристик поля излучения (плотность потока частиц, поглощенная и эффективная дозы), они отличаются различными уровнями подробности и охватываемой геометрией.

1. Область, охватывающая зону внутри измерительного павильона с ячейками по 50 см (рис. 21), именуемая далее как «грубая». По высоте она захватывает уровень бетонного пола и верхнее перекрытие защиты.

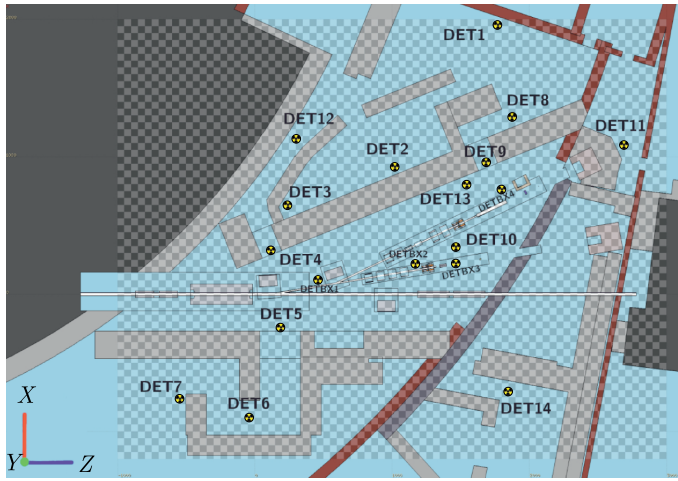


Рис. 21. Расположение «грубой» области интереса (выделена полупрозрачным шахматным узором) и детектирующих областей DET1–14, DETBX1–4 (выделены знаком радиационной опасности) в разрезе по плоскости пучка

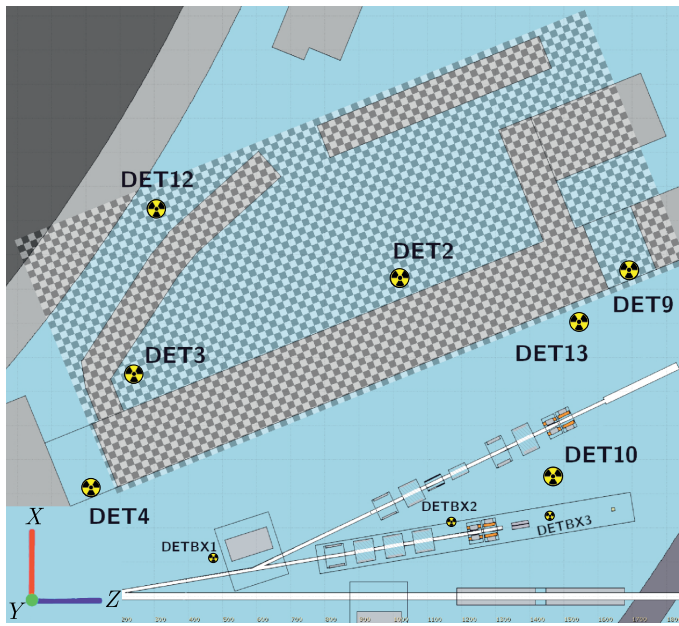


Рис. 22. Расположение «подробной» области интереса (выделена полупрозрачным шахматным узором) и близлежащих детектирующих областей (выделены знаком радиационной опасности) в разрезе по плоскости пучка

2. Область, охватывающая домики экспериментаторов с разбиением на ячейки по 20 см (рис. 22), именуемая далее как «подробная». По высоте она захватывает уровень бетонного пола и верхнее перекрытие защиты.

3. Область, охватывающая уровень подвального помещения, именуемая «галереей». Здесь используется цилиндрическая система координат, и вся область делится на сегменты, определяемые азимутальным углом $\varphi$, как это показано на рис. 23. По высоте она захватывает весь уровень от бетонного пола до верхнего перекрытия (3 м с разбиением на три ячейки).

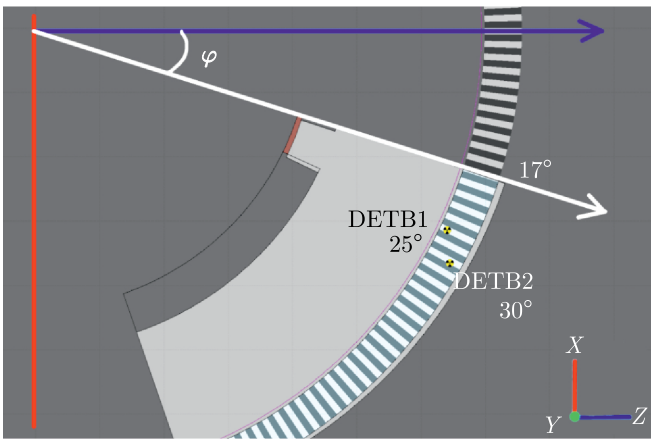


Рис. 23. Расположение «галереи» — области интереса (выделена полупрозрачным узором зебра) на уровне подвального помещения, а также детектирующих областей DETB1 и DETB2 (выделены знаком радиационной опасности). $\varphi$ — азимутальный угол, который задает положение детектирующих сегментов области интереса

4. Области, необходимые для определения формы пучка на станции ИСКРА (рис. 24), которые расположены: на выходе из ионопровода (*1*), на входе (*2*) и выходе (*3*) из деградера, на входе в мишень (*4*) и на входе в ловушку (*5*). Данные области имеют толщину по пучку 1 мм и разбиение на ячейки по 0,5 мм по перпендикулярным направлениям.

5. Области, необходимые для определения формы пучка на станции СИМБО (см. рис. 24), которые расположены: на выходе из ионопровода (*1*), после коллиматора (*2*), на входе в мишень (*3*) и на входе в ловушку (*4*). Области имеют толщину по пучку 1 мм и разбиение на ячейки по 0,5 мм.

«Грубая» и «подробная» области позволяют визуально оценить соответствие установленного для измерительного павильона зонирования

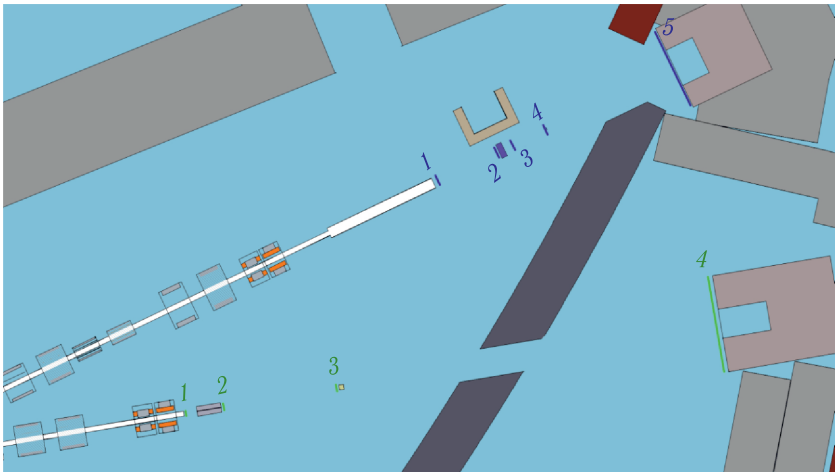


Рис. 24 (цветной в электронной версии). Расположение тонких областей для определения формы пучка на станции ИСКРА (5 областей, выделены синим цветом) и СИМБО (4 области, выделены зеленым цветом)




Рис. 25 (цветной в электронной версии). Схема установленного зонирования при работе одной из станций на уровне первого этажа (*а*) и на уровне подвального помещения (*б*) (красным цветом выделена зона запрета, зеленым — контролируемая зона)

(рис. 25) и полученных в результате расчетов пространственных распределений мощности эффективных доз. Причем первая позволяет практически полностью охватить измерительный павильон, а вторая показывает подробное распределение мощности эффективной дозы по домику экспериментаторов, для того чтобы оценить влияние «проходок». Таким образом можно определить наиболее радиационно опасные места в защите.

Помимо областей интереса, позволяющих оценить пространственное распределение характеристик излучения, были выделены специальные области интереса, или же детектирующие области (детекторы), в которых определялись: дифференциальная по энергии плотность потока частиц (оценщик USRTRACK в FLUKA), поглощенная и эффективная дозы.

Использовались детекторы нескольких типов. Цилиндрические детекторы DET1–14 высотой 170 см и радиусом 25 см расположены внутри модели павильона в местах, обозначенных знаками радиационной опасности (см. рис. 21 и 22), на уровне фальшпола. Два аналогичных детектора (DETB1 и DETB2) размещены на уровне галереи 23, под ловушками ИСКРА и СИМБО соответственно.

Цилиндрические детекторы DETAP и DETA высотой 2 м и радиусом 1 м расположены за пределами павильона, как это показано на рис. 26. Также на этом рисунке отмечен цилиндрический детектор DETB высотой 2 м и радиусом 4 м, который размещен на границе санитарно-защитной зоны в направлении движения пучка. Все детекторы за пределами измерительного павильона располагаются на уровне земли.

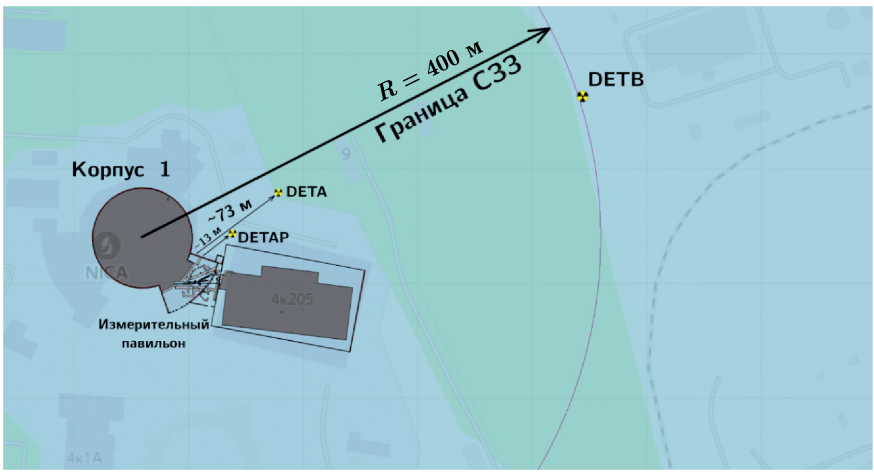


Рис. 26. Расположение детекторов DETAP, DETA и DETB за пределами измерительного павильона, для привязки к местности и правильной ориентации на воссоздаваемую для расчетов геометрию наложена карта местности

Детекторы DETBX1–4 имеют форму параллелепипедов и находятся в местах расположения электроники систем диагностики пучка вблизи каналов транспортировки (см. рис. 21). Детекторы DETBX1 и DETBX2 имеют поперечное сечение $15 \times 15$ см, размер вдоль пучка 30 см, располагаются на уровне 5 см над фальшполом. Детектор DETBX3 располагается в месте нахождения электроники системы диагностики пучка

станции СИМБО (габариты области $980 \times 1500 \times 700$ мм) на уровне фальшпола. Детектор DETBX4 размещен в области приборной стойки управления детектором ДЧС-NICA, возле стойки станции ИСКРА (габариты детектирующей области $1210 \times 400 \times 520$ мм) на уровне фальшпола.

Для области, охватывающей стойку с аппаратурой за полиэтиленовой защитой, было выделено 4 детектора, условно обозначаемых как «полка 1–4» (рис. 27). Это сделано с целью определения наиболее безопасной для размещения электроники позиции. Полки имеют размеры $61 \times 74$ см в плоскости пучка ($XZ$), но различаются по высоте: полка 1 — 60 см, полка 2 — 40 см, полка 3 — 65 см, полка 4 — 68 см.

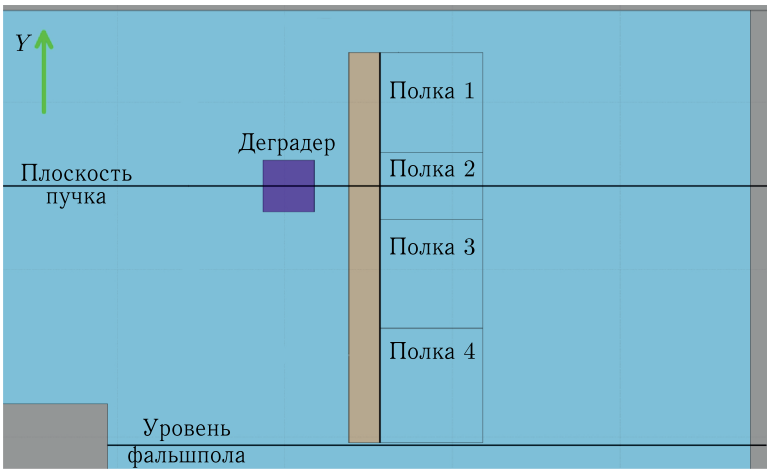


Рис. 27. Детекторы («полка 1–4») за защитой стойки с аппаратурой в разрезе перпендикулярной пучку плоскости

Во всех перечисленных детекторах определяются спектры гамма-частиц и нейтронов, а также мощность эффективной дозы, обусловленной гамма-, нейтронами и другими частицами: $\alpha, p, \pi^{\pm}, e^{\pm}, \mu^{\pm}$. В детекторах DETBX1–4 дополнительно оценивается мощность поглощенной дозы в воздухе.

Мощность поглощенной дозы рассчитывается также в биологической мишени и микрочипе: от ионов пучка, вторичных протонов, ядер гелия, электронов и других частиц, способных вносить вклад за счет ионизации в области мишеней. Это необходимо для оценки мощностей доз, создаваемых на мишенях при работе станций с определяемыми интенсивностями.

Суммарная мощность эффективной дозы в каждом детекторе не должна превышать пределов, заданных в соответствии с установленным зонированием на основании ТЗ (см. рис. 25). Таким образом, для

детекторов DET1–3, DET7, DET8, DET11, DET12, DET14, DETB1–2 предельное значение мощности эффективной дозы составляет 12 мкЗв/ч (временное пребывание персонала группы А); для детекторов DETAP и DETA — 1,2 мкЗв/ч (помещения радиационного объекта для персонала группы Б и территория санитарно-защитной зоны); для детектора DETB — 0,06 мкЗв/ч (для населения).

Ориентировочное значение предельно допустимой мощности эффективной дозы в детекторах DET4–6, DET9, DET10, DET13, DETBX1–4 и на полках за стойкой аппаратуры ИСКРА составляет $\sim 500$ мкЗв/ч. Стоит отметить, что эффективная доза не является адекватным показателем влияния создающихся радиационных условий на электронику и служит в данном случае лишь примерным ориентиром. Поэтому для детекторов DETBX1–4 рассчитываются также значения мощности поглощенной дозы в воздухе. Кроме того, по определяемым в ходе расчетов спектрам нейтронов и гамма-частиц можно оценить жесткость создаваемого при работе поля излучения и степень влияния на оборудование, расположенное в областях детектирования. Для характеристики жесткости спектров использовалось отношение флюенса нейтронов с энергией более 20 МэВ к полному флюенсу нейтронов — $\Phi_{>20\ \text{МэВ}}/\Phi_{\text{tot}}$. Спектры нейтронов с $\Phi_{>20\ \text{МэВ}}/\Phi_{\text{tot}}$ менее 5 % можно отнести к «мягким», с более высоким отношением — к «жестким». Кроме того, о жесткости спектра дает представление вклад в общую эффективную дозу по различным группам энергий.

Суммарная мощность эффективной дозы в каждой области детектирования при потерях $l$ (транспорте или выводе пучка) для любого режима работы находится как сумма по вкладам в дозу от всех частиц в эту область:

$$\dot{D}_{l,\Sigma} = \sum_i \dot{D}_{l,i} = \dot{D}_{l,n} + \dot{D}_{l,\gamma} + \dot{D}_{l,\text{др}}, \tag{2}$$

где $\dot{D}_{l,n}, \dot{D}_{l,\gamma}, \dot{D}_{l,\text{др}}$ — мощности эффективных доз, обусловленных нейтронами, фотонами и другими частицами соответственно. Под другими частицами здесь подразумеваются $\alpha$, $p$, $\pi^{\pm}, e^{\pm}, \mu^{\pm}$. Для нейтронов рассчитывалась как общая мощность дозы от нейтронов всех энергий, так и вклады по каждой выделенной группе энергий, как это описано выше.

Итоговая мощность дозы в каждой области детектирования складывается из потерь на магнитах при транспортировке пучка и потерь, обусловленных режимом работы станций на выведенном пучке:

$$\dot{D}_{\Sigma} = \dot{D}_{\text{tr},\Sigma} + \dot{D}_{\text{out},\Sigma}, \tag{3}$$

где $\dot{D}_{\text{tr},\Sigma}$ и $\dot{D}_{\text{out},\Sigma}$ находятся согласно формуле (2). Аналогичным образом определяется мощность поглощенной в воздухе дозы для детекторов DETBX1–4.

Для каждого режима работы станций определялась «безопасная интенсивность» ($I_{i,\text{safe}}$), под которой понимается предельная интенсив-

ность выведенного пучка, при которой обеспечивается установленное в предоставленном ТЗ зонирование (с дополнительным коэффициентом запаса 2), а также «оптимальная интенсивность» ($I_{i,\mathrm{optimal}}$), при которой дополнительно обеспечивается мощность эффективной дозы в области расположения электроники на уровне 500 мкЗв/ч. При этом $I_{i,\mathrm{optimal}} = fI_{i,\mathrm{safe}}$, т. е. «оптимальная интенсивность» отличается лишь на коэффициент $f$. Как происходит нормировка результата для потерь на магнитах при транспортировке пучка, описано в п. 1.3.1.

Безопасная и оптимальная интенсивности определялись путем минимизации квадрата отклонения расчетных и предельно допустимых значений суммарной мощности эффективной дозы в $i$-м детекторе:

$$\arg\min_{I_i}\left(\frac{\dot{D}_{\text{предел},i}}{\kappa} - \dot{D}_{\Sigma(\text{ион}),i}I_i\right)^2, \quad I_i > 0, \tag{4}$$

где $\dot{D}_{\text{предел},i}$ — предел допустимой мощности дозы (в пересчете на импульс); $\kappa$ — коэффициент запаса, принимаемый 2 для $I_{i,\mathrm{safe}}$ и 1 для $I_{i,\mathrm{optimal}}$; $\dot{D}_{\Sigma(\text{ион}),i}$ — расчетная суммарная мощность эффективной дозы в детекторе $i$ при работе одной из станций в одном из режимов с нормировкой на один ион.

При этом из всех определенных интенсивностей выбиралась наименьшая, она приводится в результатах как $I_{i,\mathrm{safe}}$. Интенсивность $I_{i,\mathrm{optimal}}$ определялась на основании проведенной аналогичным образом оптимизации с учетом детекторов DETBX1–4 и $\kappa = 1$.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Всего было выполнено 22 независимых расчета для получения результатов по каждому из приведенных ранее режимов работы станций. Общее количество независимых историй (транспортируемых первичных частиц) в каждом расчете было обусловлено требуемой статистической погрешностью, принималось, что она должна находиться для интегральных характеристик (флюенс, суммарная эффективная доза) на уровне не хуже 10 %. В зависимости от рассчитываемого режима работы станций для обеспечения требуемой статистической погрешности на уровне 10 % и лучше потребовалось произвести транспорт $\sim 10^7$–$10^9$ ионов, но даже в таком случае не для всех детектирующих областей получилось добиться результата на уровне 10 % и лучше. Все расчеты выполнялись с использованием вычислительных мощностей Лаборатории радиационной биологии ОИЯИ. Было задействовано пять серверов, для обеспечения необходимой статистической погрешности вычисления выполнялись параллельно на протяжении 2 мес.

Получен большой объем данных о радиационной обстановке при работе станций СИМБО и ИСКРА в различных режимах. Далее приводятся результаты для работы станции СИМБО в режиме № 2 с пучком

углерода и ИСКРА в режиме № 1 с пучком висмута, на эти режимы планируется наибольшее время работы станций, они обуславливают наибольшую радиационную нагрузку. Наиболее полные результаты были изложены в отчете «Моделирование радиационной обстановки на станциях и каналах прикладных исследований в измерительном павильоне корпуса № 1 ЛФВЭ ОИЯИ» за 2024 г.

**2.1. Режим облучения № 2 на станции СИМБО ($^{12}C^{6+}$ с энергией 1110 МэВ/нуклон).** Расчетная конфигурация для данного режима работы обсуждалась в п. 1.3.4. Далее приводятся и анализируются результаты моделирования работы станции с пучком $^{12}C^{6+}$ с энергией 1110 МэВ/нуклон. Пучок в данном случае является сканирующим, и применяется коллиматор с коническим отверстием (диаметр на входе 30 мм, на выходе — 42 мм), он является основным источником вторичного излучения. На рис. 28 показана форма пучка $^{12}C^{6+}$ по мере его движения до облучаемого объекта в единицах плотности потока частиц

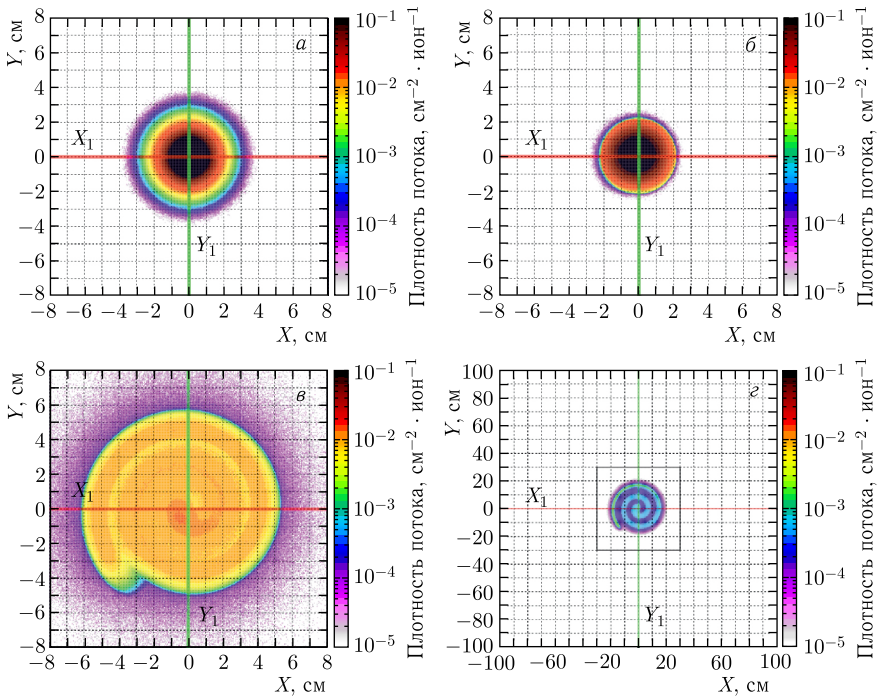


Рис. 28. Форма пучка первичных ионов при работе станции СИМБО (только от выведенного пучка) в режиме № 2 ($^{12}C^{6+}$ с 1110 МэВ/нуклон): *а*) до прохождения через коллиматор; *б*) после прохождения через коллиматор; *в*) на входе в мишень; *г*) на входе в ловушку, где квадрат обозначает границы отверстия ловушки

на один ион пучка. На коллиматоре теряется около 22 % частиц пучка. Прошедший через отверстие пучок движется по воздуху до мишени, на рис. 28, *г* показано, что весь пучок ионов после мишени попадает в пределы отверстия ловушки СИМБО.

При взаимодействии первичного пучка ионов с коллиматором, с окружающим воздухом и мишенью образуются вторичные протоны, ядра гелия и другие частицы. На рис. 29 показано пространственное распределение образующихся вторичных протонов от $^{12}C^{6+}$. Как видно, не все вторичные частицы укладываются в отверстие ловушки.

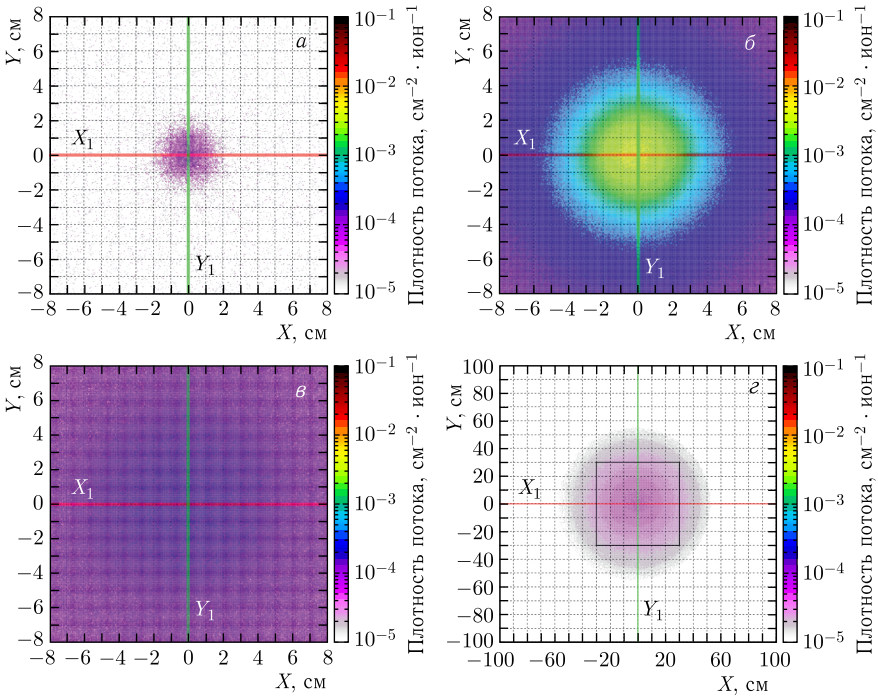


Рис. 29. Вторичные протоны при работе станции СИМБО (только от выведенного пучка) в режиме № 2 ($^{12}C^{6+}$ с энергией 1110 МэВ/нуклон): *а*) до прохождения через коллиматор; *б*) после прохождения через коллиматор; *в*) на входе в мишень; *г*) на входе в ловушку, где квадрат обозначает границы отверстия ловушки

На рис. 30 и 31 приведены спектры нейтронов в единицах летаргии в детекторах. Наиболее жесткие спектры нейтронов наблюдаются в детекторах DETB2 ∼ 37 % (под ловушкой) и DET2 ∼ 23 % (в домике экспериментаторов).

На основе полученных результатов найдена предельная интенсивность $I_{\mathrm{S2/C,safe}} = 6{,}146 \cdot 10^8$ ион/импульс, при которой соблюдается зо-

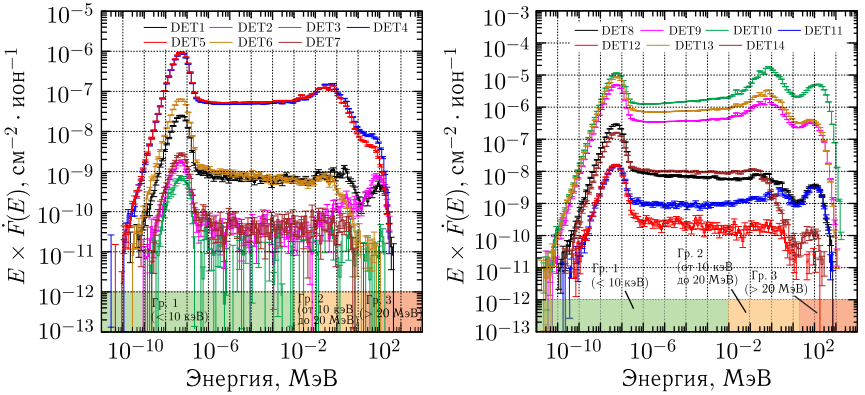


Рис. 30. Дифференциальные энергетические спектры плотности потока нейтронов в детекторах DET1–14 при работе станции СИМБО (только от выведенного пучка) в режиме № 2 ($^{12}C^{6+}$ с энергией 1110 МэВ/нуклон)

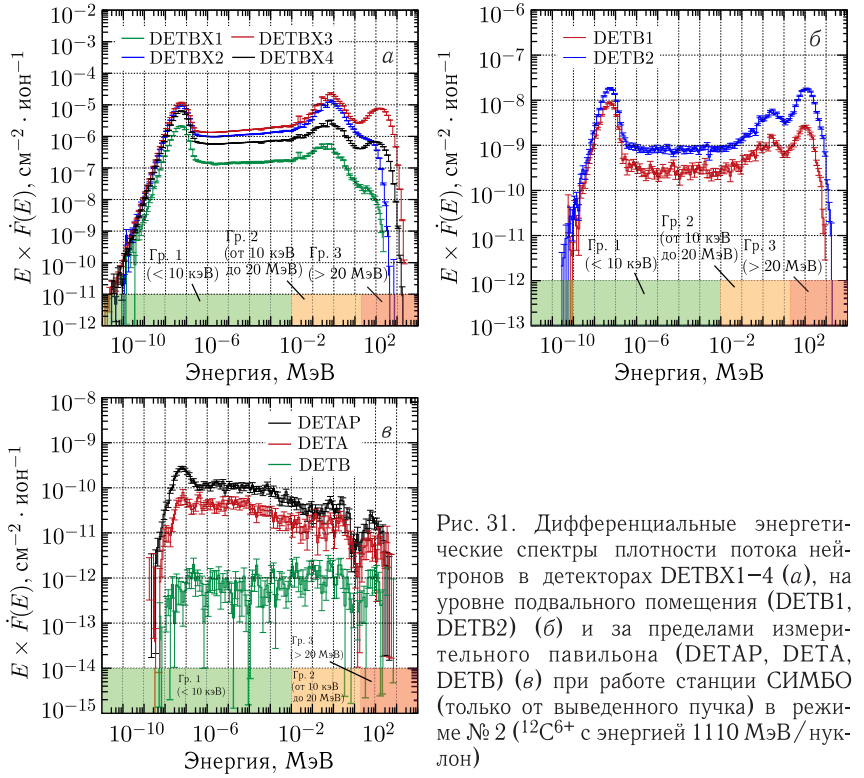


Рис. 31. Дифференциальные энергетические спектры плотности потока нейтронов в детекторах DETBX1–4 (*а*), на уровне подвального помещения (DETB1, DETB2) (*б*) и за пределами измерительного павильона (DETAP, DETA, DETB) (*в*) при работе станции СИМБО (только от выведенного пучка) в режиме № 2 ($^{12}C^{6+}$ с энергией 1110 МэВ/нуклон)

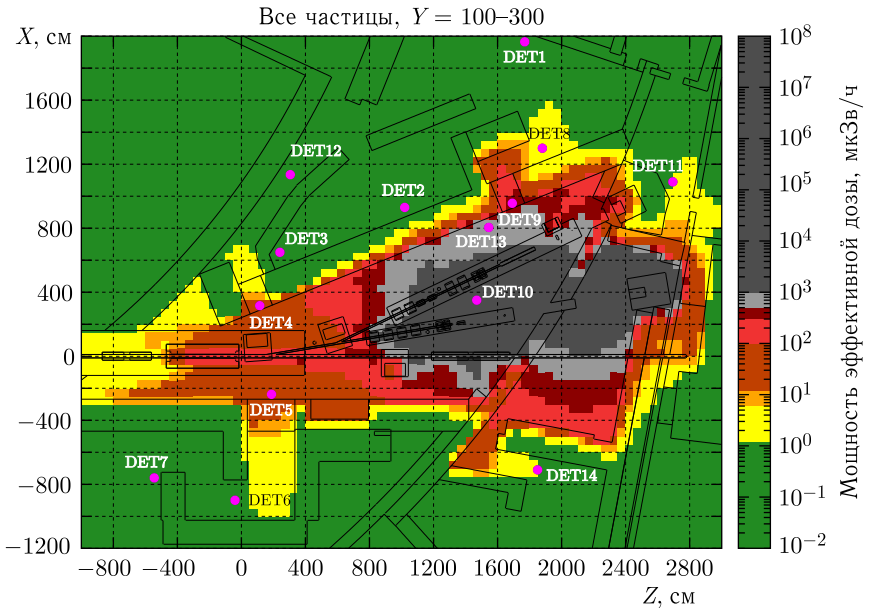


Рис. 32 (цветной в электронной версии). Двухмерная проекция пространственного распределения суммарной мощности эффективной дозы при работе станции СИМБО в режиме № 2 ($^{12}C^{6+}$ с энергией 1110 МэВ/нуклон и $I_{\mathrm{S2/C,safe}} = 6{,}146 \times \times 10^8$ ион/импульс). Фиолетовыми кружками отмечено расположение детекторов

нирование для персонала. На рис. 32 приведена проекция пространственного распределения мощности эффективной дозы с вкладом от всех учитываемых в расчете частиц с усреднением по высоте на 2 м от уровня фальшпола ($Y = 100$ см). Здесь учтены как потери при транспортировке пучка на магнитных элементах, так и потери, обусловленные выведенным пучком. Данное изображение позволяет визуально оценить соответствие расчетной дозовой нагрузки при интенсивности $I_{\mathrm{S2/C,safe}}$ и устанавливаемого в ТЗ зонирования.

Таким образом, при интенсивности $6{,}146 \cdot 10^8$ ион/импульс с запасом ($\kappa \geqslant 2$) обеспечивается зонирование. Наихудшие значения наблюдаются в детекторах DETB2 — 6 мкЗв/ч (под ловушкой СИМБО) и DET8 — 3,077 мкЗв/ч. При этом не соблюдаются установленные ориентировочные предельные значения в детекторах DETBX2 (2521 мкЗв/ч), DETBX3 (6743 мкЗв/ч) и DETBX4 (888,2 мкЗв/ч) — местах расположения электроники. При режиме работы с меньшей ($f = 0{,}074$, см. п. 1.4) интенсивностью $I_{\mathrm{S2/C,optimal}} = 4{,}557 \cdot 10^7$ ион/импульс во всех детекторах будут соблюдаться установленные пределы с большим запасом, ориентировочное предельное значение (около 500 мкЗв/ч) будет лишь в детекто-

ре DETBX3, расположенном в месте нахождения электроники станции СИМБО за коллиматором.

Мощность поглощенной дозы в облучаемом объекте («толстая» биологическая мишень, 10 см по пучку) при интенсивности $I_{\mathrm{S2/C,safe}}$ составляет около 0,35 Гр/мин ($2{,}078 \cdot 10^7$ мкГр/ч), причем на ионы углерода приходится около 0,287 Гр/мин ($\sim 82\,\%$), а остальное — на вторичные частицы.

На уровне подвального помещения («галереи») пространственное распределение мощности эффективной дозы (без вклада от потерь на магнитах) имеет колоколообразную форму, как это показано на рис. 33. Пиковые значения находятся под ловушкой станции СИМБО (детектор DETB2) с небольшим смещением. Это обусловлено тем, что большая часть потерь происходит не на коллиматоре, а в ловушке. Нейтроны вносят наибольший вклад в эффективную дозу, причем вклад нейтронов с энергиями свыше 20 МэВ является определяющим и составляет около 70 % для детектора DETB2.

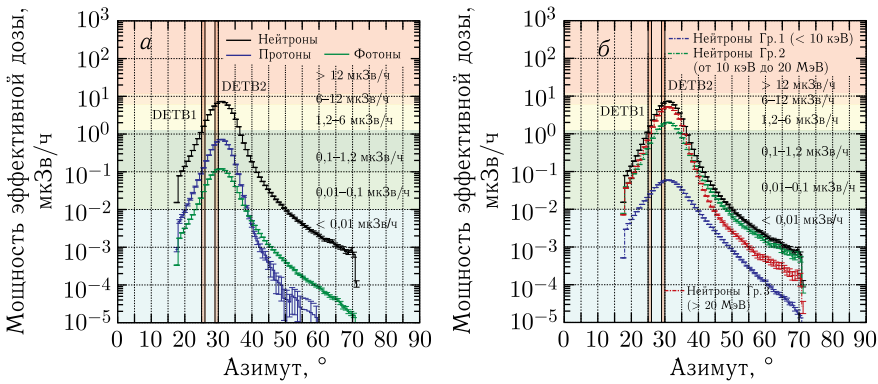


Рис. 33. Пространственное распределение (по азимуту) мощности эффективной дозы при работе станции СИМБО (только от выведенного пучка) в режиме № 2 ($^{12}C^{6+}$ с энергией 1110 МэВ/нуклон и $I_{\mathrm{S2/C,safe}} = 6{,}146 \cdot 10^8$ ион/импульс) на уровне подвального помещения («галереи»): *а*) вклады от нейтронов, протонов и фотонов; *б*) вклады в мощность эффективной дозы от различных групп нейтронов

**2.2. Режим облучения № 1 на станции ИСКРА ($^{209}Bi^{83+}$ с энергией 179 МэВ/нуклон).** Расчетная конфигурация для данного режима работы станции ИСКРА была приведена в п. 1.3.2. Расчет производился для двух типов ионов: $^{209}Bi^{83+}$ с энергией 179 МэВ/нуклон и $^{40}Ar^{18+}$ с энергией 170 МэВ/нуклон. Далее приводятся и анализируются результаты только для пучка $^{209}Bi^{83+}$ с энергией 179 МэВ/нуклон. В данном режиме работы для локализации пика Брэгга в облучаемом микрочипе на пучок устанавливается деградер толщиной 2003 мкм. Таким образом, микросхема и деградер являются основными источниками вторичного

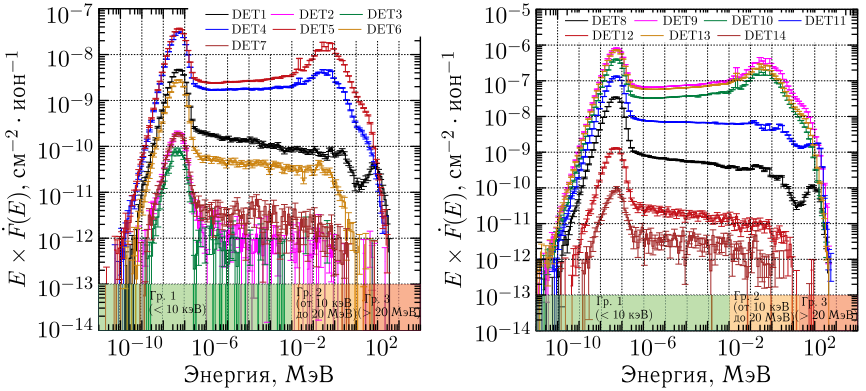


Рис. 34. Дифференциальные энергетические спектры плотности потока нейтронов в детекторах DET1–14 при работе станции ИСКРА (только от выведенного пучка) в режиме № 1 ($^{209}Bi^{83+}$ с энергией 179 МэВ/нуклон)

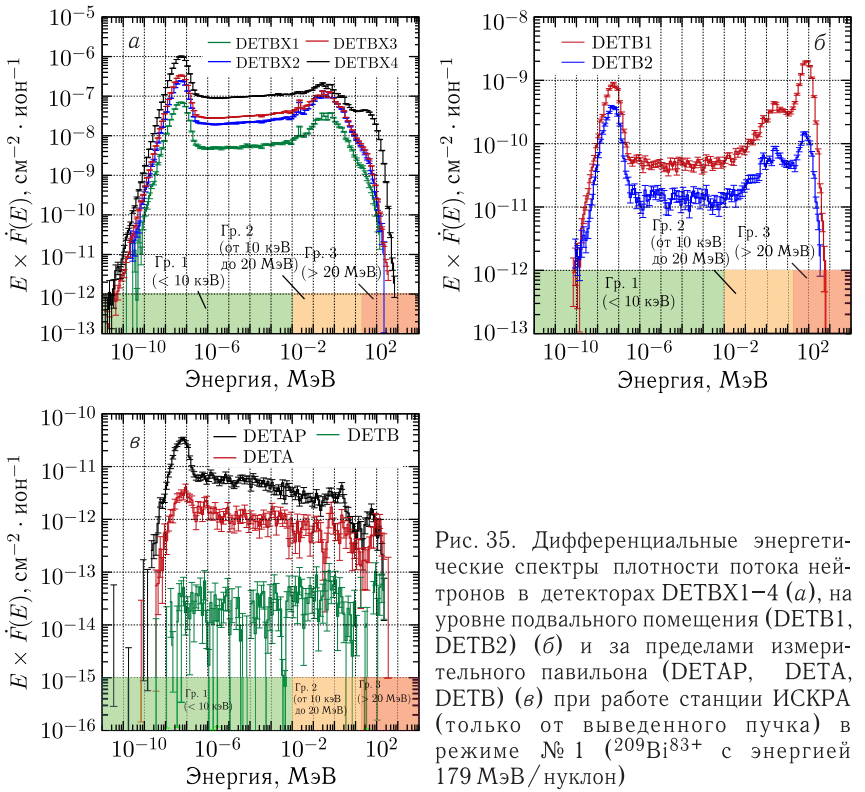


Рис. 35. Дифференциальные энергетические спектры плотности потока нейтронов в детекторах DETBX1–4 (*а*), на уровне подвального помещения (DETB1, DETB2) (*б*) и за пределами измерительного павильона (DETAP, DETA, DETB) (*в*) при работе станции ИСКРА (только от выведенного пучка) в режиме № 1 ($^{209}Bi^{83+}$ с энергией 179 МэВ/нуклон)

излучения. Форма пучка $^{209}Bi^{83+}$ до облучаемой мишени практически неизменна, пучок движется по воздуху до деградера, на котором теряется около 4 % частиц пучка, затем пучок движется по воздуху до мишени, после микросхемы наблюдается крайне незначительное число первичных ионов, что указывает на практически полное поглощение первичных частиц в чипе.

На рис. 34 и 35 показаны спектры нейтронов в единицах летаргии в детекторах. Наиболее жесткие спектры нейтронов наблюдаются в детекторах DETB1 ∼ 45 % и DETB2 ∼ 16 % (на уровне подвального помещения). Детектор DETB1 находится на оси пучка прямо под ловушкой станции ИСКРА, отсюда большой вклад высокоэнергетической части спектра в суммарную мощность эффективной дозы (см. рис. 38).

На рис. 36 приведены спектры нейтронов и фотонов в детекторах «полка 1–4», которые располагаются за защитой стойки с аппаратурой на станции ИСКРА (см. рис. 27). Наибольшая жесткость спектра нейтронов (около 20 %) наблюдается в детекторе «полка 2», наименьшая (около 5 %) — в детекторе «полка 4».

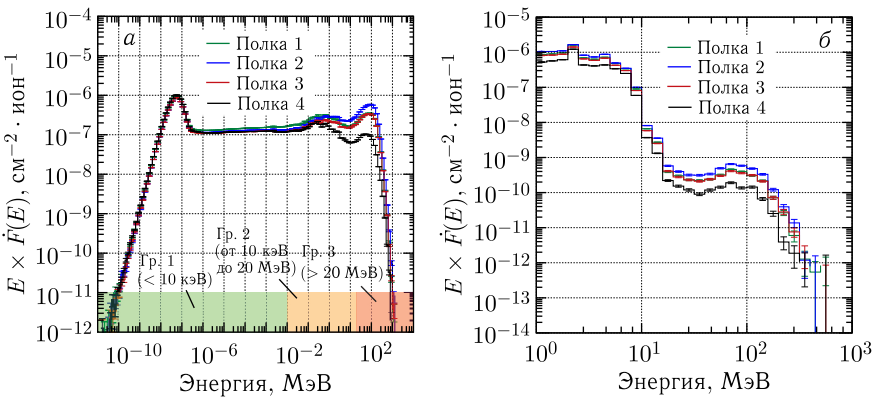


Рис. 36. Дифференциальные энергетические спектры плотности потока нейтронов (*а*) и фотонов (*б*) в детекторах «полка 1–4» за защитой стойки с аппаратурой при работе станции ИСКРА (только от выведенного пучка) в режиме № 1 ($^{209}Bi^{83+}$ с энергией 179 МэВ/нуклон)

На основе полученных результатов была найдена предельная интенсивность $I_{\mathrm{I1/Bi,safe}} = 1{,}599 \cdot 10^9$ ион/импульс, при которой соблюдается зонирование. На рис. 37 приведена проекция пространственного распределения мощности эффективной дозы с вкладом от всех учитываемых в расчете частиц с усреднением по высоте на 2 м от уровня фальшпола ($Y = 100$ см). Здесь учтены как потери при транспортировке пучка на магнитных элементах, так и потери, обусловленные выведенным пучком. Данное изображение позволяет визуально оценить соответствие расчетной дозовой нагрузки при интенсивности $I_{\mathrm{I1/Bi,safe}}$ и предлагаемого зони-

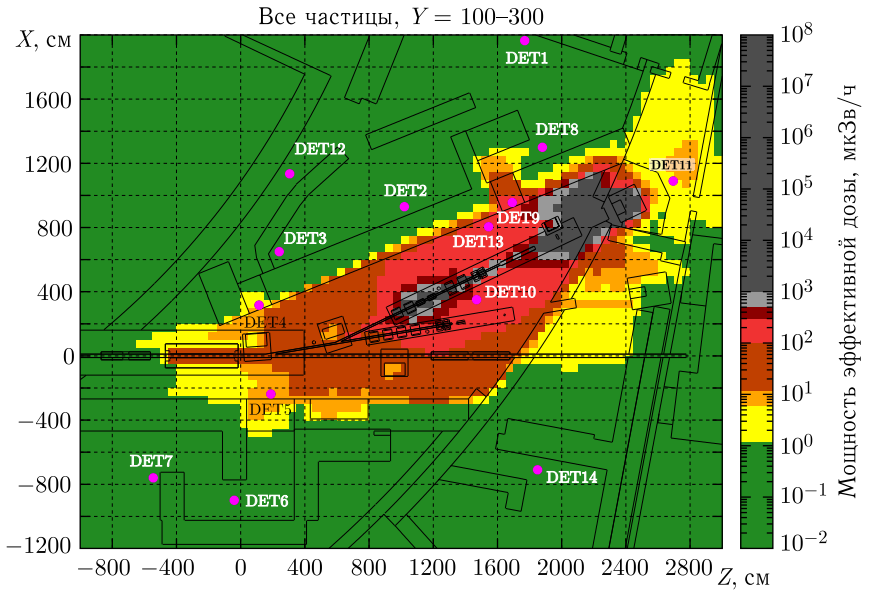


Рис. 37 (цветной в электронной версии). Двухмерная проекция пространственного распределения суммарной мощности эффективной дозы при работе станции ИСКРА в режиме № 1 ($^{209}Bi^{83+}$ с энергией 179 МэВ/нуклон и $I_{I1/Bi,safe} = 1{,}599 \cdot 10^9$ ион/импульс). Фиолетовыми кружками отмечено расположение детекторов

рования. Результаты расчетов позволили определить проблемные области в геометрии, например, оранжевое пятно вблизи DET11 (см. рис. 37) обусловлено тем, что в начальной версии геометрии ловушки не были закрыты сверху (см. рис. 9). В дальнейшем было принято решение закрыть ловушки сверху слоем бетона толщиной 50 см.

Таким образом, при интенсивности $1{,}599 \cdot 10^9$ ион/импульс с запасом ($\kappa \geqslant 2$) обеспечивается зонирование. Наихудшие значения наблюдаются в детекторах DET11 — 6 мкЗв/ч (детектор расположен сразу за ловушкой ИСКРА), DETB1 — 1,103 мкЗв/ч (под ловушкой ИСКРА) и DET8 — 0,527 мкЗв/ч. При этом не соблюдается установленное ориентировочное предельное значение в детекторе «полка 2» (637,9 мкЗв/ч) — месте расположения электроники за стойкой. При режиме работы с меньшей ($f = 0{,}784$, см. п. 1.4) интенсивностью $I_{I1/Bi,optimal} = 1{,}253 \times$ $\times 10^9$ ион/импульс во всех детекторах будут соблюдаться установленные пределы с большим запасом, предельное значение (около 500 мкЗв/ч) будет лишь в детекторе «полка 2», расположенном в месте нахождения аппаратуры за стойкой станции ИСКРА.

Описание облучаемой мишени (микрочипа) приведено в п. 1.1.3. Мощность поглощенной дозы в мишени при интенсивности $I_{I1/Bi,safe}$

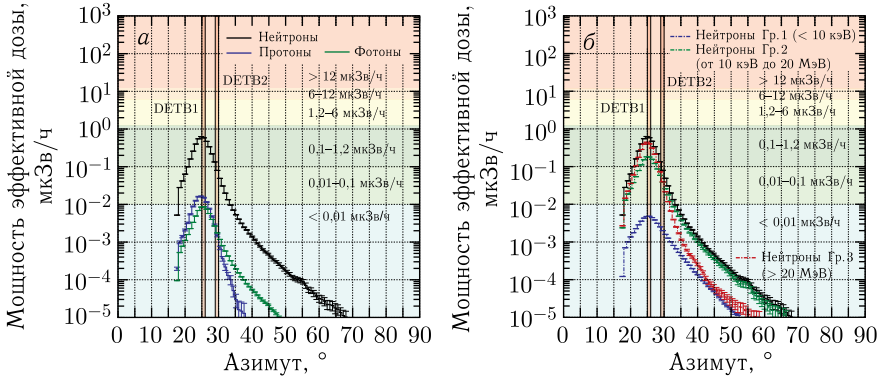


Рис. 38. Пространственное распределение (по азимуту) мощности эффективной дозы при работе станции СИМБО (только от выведенного пучка) в режиме № 1 ($^{209}Bi^{83+}$ с энергией 179 МэВ/нуклон и $I_{\mathrm{I1/Bi,safe}} = 1{,}599 \cdot 10^9$ ион/импульс) на уровне подвального помещения («галереи»): *а*) вклады от нейтронов, протонов и фотонов; *б*) вклады в мощность эффективной дозы от различных групп нейтронов

составляет около 2029 Гр/мин ($1{,}217 \cdot 10^{11}$ мкГр/ч) в пике Брэгга, причем на ионы висмута приходится около 95 %, а остальные 5 % обусловлены вкладом вторичных частиц.

На уровне подвального помещения («галереи») пространственное распределение мощности эффективной дозы (без вклада от потерь на магнитах) имеет колоколообразную форму, как это показано на рис. 38. Пиковые значения находятся четко под ловушкой станции ИСКРА (детектор DETB1). Нейтроны вносят наибольший вклад в эффективную дозу, причем вклад нейтронов с энергиями свыше 20 МэВ является определяющим и составляет около 71 % для детектора DETB1, а для детектора DETB2 он уже составляет около 50 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено детальное моделирование для прогнозирования радиационной обстановки при работе станций для прикладных исследований СИМБО и ИСКРА. Расчетным путем определены предельные интенсивности пучка для работы на станциях СИМБО и ИСКРА в различных режимах. Полученные результаты сведены в табл. 3 для станции СИМБО и табл. 4 для станции ИСКРА. Колонка «Критические детекторы» в таблице — это детекторы, в которых наблюдаются максимальные значения мощности эффективной дозы в зоне временного пребывания персонала группы А при предельной интенсивности $I_{\mathrm{safe}}$, при которой соблюдается зонирование. Также в таблицах указаны интенсивности $I_{\mathrm{optimal}}$, при которых дополнительно соблюдаются установленные пределы для детекторов, находящихся в местах расположения электроники.

*Таблица* 3. **Предельные интенсивности $I_i$ для работы в различных режимах на станции СИМБО и соответствующие мощности поглощенной дозы $\dot{D}_i$ в облучаемых объектах. Safe — соблюдается зонирование, optimal — соблюдается зонирование и установленные пределы для электроники. Критические детекторы — детекторы с наибольшими значениями мощности эффективной дозы при интенсивности $I_{\text{safe}}$**

| № | Описание режима | $I_i$, ион/импульс | $\dot{D}_i$, Гр/мин | Критические детекторы |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Облучение напролет | Safe | | DETB2 (6 мкЗв/ч) |
| | без сканирования | 2,650$E$+08 | 1,419$E$+00 | DET8 (4,946 мкЗв/ч) |
| | (с коллиматором) | Optimal | | DETB1 (1,090 мкЗв/ч) |
| | $^{84}Kr^{36+}$ с 800 МэВ/нуклон | 8,639$E$+06 | 4,626$E$−02 | DET1 (0,745 мкЗв/ч) |
| | Облучение напролет | Safe | | DETB2 (6 мкЗв/ч) |
| | без сканирования | 4,912$E$+08 | 7,278$E$−02 | DET8 (5,607 мкЗв/ч) |
| | (с коллиматором) | Optimal | | DETB1 (1,161 мкЗв/ч) |
| | $^{12}C^{6+}$ с 1110 МэВ/нуклон | 1,279$E$+07 | 1,895$E$−03 | DET1 (0,891 мкЗв/ч) |
| 2 | Облучение напролет со | Safe | | DETB2 (6 мкЗв/ч) |
| | сканированием по спи- | 1,779$E$+08 | 3,716$E$+00 | DET8 (2,622 мкЗв/ч) |
| | рали (с коллиматором) | Optimal | | DET11 (1,283 мкЗв/ч) |
| | $^{84}Kr^{36+}$ с 800 МэВ/нуклон | 2,565$E$+07 | 5,357$E$−01 | DET14 (0,982 мкЗв/ч) |
| | Облучение напролет со | Safe | | DETB2 (6 мкЗв/ч) |
| | сканированием по спи- | 6,146$E$+08 | 3,464$E$−01 | DET8 (3,077 мкЗв/ч) |
| | рали (с коллиматором) | Optimal | | DET11 (1,328 мкЗв/ч) |
| | $^{12}C^{6+}$ с 1110 МэВ/нуклон | 4,557$E$+07 | 2,568$E$−02 | DET14 (1,32 мкЗв/ч) |
| 3 | Облучение напролет со | Safe | | DETB2 (6 мкЗв/ч) |
| | сканированием по спи- | 2,910$E$+08 | 7,551$E$+00 | DET11 (1,887 мкЗв/ч) |
| | рали (без коллиматора) | Optimal | | DET14 (1,617 мкЗв/ч) |
| | $^{84}Kr^{36+}$ с 800 МэВ/нуклон | 2,041$E$+08 | 5,296$E$+00 | DET8 (1,239 мкЗв/ч) |
| | Облучение напролет со | Safe | | DETB2 (6 мкЗв/ч) |
| | сканированием по спи- | 1,221$E$+09 | 8,217$E$−01 | DET14 (2,844 мкЗв/ч) |
| | рали (без коллиматора) | Optimal | | DET11 (2,247 мкЗв/ч) |
| | $^{12}C^{6+}$ с 1110 МэВ/нуклон | 5,758$E$+08 | 3,875$E$−01 | DET8 (1,048 мкЗв/ч) |
| 4 | Настроечный режим | Safe | | DETB2 (6 мкЗв/ч) |
| | без сканирования | 2,192$E$+08 | — | DET8 (1,618 мкЗв/ч) |
| | (только диагностика) | Optimal | | DET11 (1,597 мкЗв/ч) |
| | $^{84}Kr^{36+}$ с 800 МэВ/нуклон | 7,742$E$+07 | — | DET14 (1,164 мкЗв/ч) |
| | Настроечный режим | Safe | | DETB2 (6 мкЗв/ч) |
| | без сканирования | 1,025$E$+09 | — | DET14 (2,402 мкЗв/ч) |
| | (только диагностика) | Optimal | | DET11 (1,935 мкЗв/ч) |
| | $^{12}C^{6+}$ с 1110 МэВ/нуклон | 2,438$E$+08 | — | DET8 (1,320 мкЗв/ч) |

*Табл. 3. Окончание*

| № | Описание режима | $I_i$, ион/импульс | $\dot{D}_i$, Гр/мин | Критические детекторы |
|---|---|---|---|---|
| 5 | Настроечный режим | Safe | | DETB2 (6 мкЗв/ч) |
| | со сканированием | 2,231$E$+08 | — | DET8 (1,640 мкЗв/ч) |
| | по спирали (только | Optimal | | DET11 (1,610 мкЗв/ч) |
| | диагностика) $^{84}Kr^{36+}$ с 800 МэВ/нуклон | 7,843$E$+07 | — | DET14 (1,166 мкЗв/ч) |
| | Настроечный режим | Safe | | DETB2 (6 мкЗв/ч) |
| | со сканированием | 1,032$E$+09 | — | DET14 (2,380 мкЗв/ч) |
| | по спирали (только | Optimal | | DET11 (1,963 мкЗв/ч) |
| | диагностика) $^{12}C^{6+}$ с 1110 МэВ/нуклон | 2,474$E$+08 | — | DET8 (1,297 мкЗв/ч) |

*Таблица* 4. **Предельные интенсивности $I_i$ для работы в различных режимах на станции ИСКРА и соответствующие им мощности поглощенной дозы $\dot{D}_i$ в облучаемой мишени (микросхеме). Safe — соблюдается зонирование, optimal — соблюдается зонирование и установленные пределы для электроники. Критические детекторы — детекторы с наибольшими значениями мощности эффективной дозы при интенсивности $I_{\text{safe}}$**

| № | Описание режима | $I_i$, ион/импульс | $\dot{D}_i$, Гр/мин | Критические детекторы |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Облучение микросхемы | Safe | | DET11 (6 мкЗв/ч) |
| | в пике Брэгга без скани- | 1,599$E$+09 | 2,029$E$+03 | DETB1 (1,103 мкЗв/ч) |
| | рования (с деградером) | Optimal | | DET8 (0,5271 мкЗв/ч) |
| | $^{209}Bi^{83+}$ с 179 МэВ/нуклон | 1,253$E$+09 | 1,590$E$+03 | DETB2 (0,1491 мкЗв/ч) |
| | Облучение микросхемы | Safe | | DET11 (6 мкЗв/ч) |
| | в пике Брэгга без скани- | 2,862$E$+09 | 3,723$E$+02 | DETB1 (1,121 мкЗв/ч) |
| | рования (с деградером) | Optimal | | DET8 (0,5365 мкЗв/ч) |
| | $^{40}Ar^{18+}$ с 170 МэВ/нуклон | 1,571$E$+09 | 2,043$E$+02 | DETB2 (0,1522 мкЗв/ч) |
| 2 | Облучение микросхемы | Safe | | DET11 (6 мкЗв/ч) |
| | напролет без сканиро- | 2,287$E$+08 | 9,854$E$+01 | DETB1 (1,279 мкЗв/ч) |
| | вания $^{209}Bi^{83+}$ | Optimal | | DET8 (0,4409 мкЗв/ч) |
| | с 350 МэВ/нуклон | 2,287$E$+08 | 9,854$E$+01 | DETB2 (0,1623 мкЗв/ч) |
| | Облучение микросхемы | Safe | | DET11 (6 мкЗв/ч) |
| | напролет без сканиро- | 3,531$E$+08 | 6,135$E$+00 | DETB1 (0,918 мкЗв/ч) |
| | вания $^{40}Ar^{18+}$ | Optimal | | DET8 (0,5903 мкЗв/ч) |
| | с 430 МэВ/нуклон | 3,531$E$+08 | 6,135$E$+00 | DETB2 (0,1707 мкЗв/ч) |

*Табл. 4. Окончание*

| № | Описание режима | $I_i$, ион/импульс | $\dot{D}_i$, Гр/мин | Критические детекторы |
|---|---|---|---|---|
| 3 | Облучение микросхемы напролет со сканированием $^{209}Bi^{83+}$ с 350 МэВ/нуклон | Safe | | DET11 (6 мкЗв/ч) |
| | | 2,499$E$+08 | 8,918$E$+00 | DETB1 (1,045 мкЗв/ч) |
| | | Optimal | | DET8 (0,4476 мкЗв/ч) |
| | | 2,499$E$+08 | 8,918$E$+00 | DETB2 (0,154 мкЗв/ч) |
| | Облучение микросхемы напролет со сканированием $^{40}Ar^{18+}$ с 430 МэВ/нуклон | Safe | | DET11 (6 мкЗв/ч) |
| | | 3,712$E$+08 | 5,320$E$−01 | DETB1 (0,6064 мкЗв/ч) |
| | | Optimal | | DET8 (0,5748 мкЗв/ч) |
| | | 3,712$E$+08 | 5,320$E$−01 | DETB2 (0,155 мкЗв/ч) |

При работе станции СИМБО во всех рассматриваемых режимах в детекторе DET2, который располагается внутри домика экспериментаторов, наблюдаются жесткие спектры нейтронов со значениями $\Phi_{>20\text{ МэВ}}/\Phi_{\text{tot}}$ от 6,5 до 24,8 % (в зависимости от режима). Это обусловлено положением детектора относительно коллиматора и наличием «проходки» в домике. Так, наименее жесткие спектры создаются при работе станции СИМБО в режимах № 3–5 (6,5–11,1 %), т. е. без применения коллиматора. Наименее жесткий спектр (6,5 %) создается при работе в режиме № 3 с пучком криптона, а наиболее жесткий спектр (24,8 %) наблюдается при работе в режиме № 1 (коллиматор с наименьшим диаметром 10 мм) с пучком углерода. Наиболее безопасное место внутри домика экспериментаторов при работе станции СИМБО находится вблизи детектора DET3.

Полученные результаты показывают, что использование коллиматора заметно сказывается на общей радиационной обстановке и заметно влияет на близлежащую электронику, особенно в месте расположения детектора DETBX3 при наименьшем диаметре отверстия коллиматора 10 мм (режим № 1). При этом также увеличивается вклад в дозу от вторичных частиц в облучаемом образце. Например, для режима № 2 с криптоном вклад первичных ионов в мощность поглощенной дозы составляет 70 %, а в режиме № 3 (без коллиматора) — 89 %. Для аналогичных режимов с углеродом — 83 % против 91 %.

Результаты позволяют также полагать, что при работе на станции СИМБО при оптимальной интенсивности, при которой соблюдается как зонирование, так и установленный ориентировочный предел 500 мкЗв/ч для детекторов в области размещения электроники, не всегда возможно обеспечение требуемой мощности поглощенной дозы в облучаемом объекте, она составляет во всех случаях, кроме режима № 3 с криптоном, менее 1 Гр/мин.

В год на облучение на станции СИМБО в режиме № 1 отводится 30 ч, в режиме № 2 — 180 ч, в режиме № 3 — 60 ч, а в режимах № 4 и 5 (настройка) — 30 ч, итого — 300 ч.

Полученные результаты позволяют оценить суммарные эффективные дозы в детекторах за пределами измерительного павильона (DETAP, DETA, DETB), для этого были выбраны режимы с наибольшими значениями суммарных мощностей эффективных доз при определенных расчетным путем предельных интенсивностях $I_{\text{safe}}$:

• в режиме № 1 — это пучок углерода: $\dot{D}_{\text{DETAP},\Sigma} = 2{,}477 \times$ $\times\, 10^{-2}$ мкЗв/ч, $\dot{D}_{\text{DETA},\Sigma} = 7{,}091 \cdot 10^{-3}$ мкЗв/ч, $\dot{D}_{\text{DETB},\Sigma} = 7{,}800 \times$ $\times\, 10^{-4}$ мкЗв/ч;

• в режиме № 2 — это пучок углерода: $\dot{D}_{\text{DETAP},\Sigma} = 1{,}686 \times$ $\times\, 10^{-2}$ мкЗв/ч, $\dot{D}_{\text{DETA},\Sigma} = 7{,}304 \cdot 10^{-3}$ мкЗв/ч, $\dot{D}_{\text{DETB},\Sigma} = 6{,}426 \times$ $\times\, 10^{-4}$ мкЗв/ч;

• в режиме № 3 — это пучок углерода: $\dot{D}_{\text{DETAP},\Sigma} = 1{,}612 \times$ $\times\, 10^{-2}$ мкЗв/ч, $\dot{D}_{\text{DETA},\Sigma} = 8{,}956 \cdot 10^{-3}$ мкЗв/ч, $\dot{D}_{\text{DETB},\Sigma} = 9{,}008 \times$ $\times\, 10^{-4}$ мкЗв/ч.

• в режимах № 4 и № 5 — это пучок углерода (режим № 5): $\dot{D}_{\text{DETAP},\Sigma} = 1{,}535 \cdot 10^{-2}$ мкЗв/ч, $\dot{D}_{\text{DETA},\Sigma} = 8{,}837 \cdot 10^{-3}$ мкЗв/ч, $\dot{D}_{\text{DETB},\Sigma} = 8{,}614 \cdot 10^{-4}$ мкЗв/ч.

Таким образом, суммарная эффективная доза за год при работе станции СИМБО составит:

• для детектора DETAP: $30$ ч $\cdot\, 2{,}477 \cdot 10^{-2}$ мкЗв/ч $+\, 180$ ч $\cdot\, 1{,}686 \times$ $\times\, 10^{-2}$ мкЗв/ч $+\, 60$ ч $\cdot\, 1{,}612 \cdot 10^{-2}$ мкЗв/ч $+\, 30$ ч $\cdot\, 1{,}535 \cdot 10^{-2}$ мкЗв/ч $\approx$ $\approx 5{,}21$ мкЗв;

• для детектора DETA: $30$ ч $\cdot\, 7{,}091 \cdot 10^{-3}$ мкЗв/ч $+\, 180$ ч $\cdot\, 7{,}304 \times$ $\times\, 10^{-3}$ мкЗв/ч $+\, 60$ ч $\cdot\, 8{,}956 \cdot 10^{-3}$ мкЗв/ч $+\, 30$ ч $\cdot\, 8{,}837 \cdot 10^{-3}$ мкЗв/ч $\approx$ $\approx 2{,}33$ мкЗв;

• для детектора DETB: $30$ ч $\cdot\, 7{,}800 \cdot 10^{-4}$ мкЗв/ч $+\, 180$ ч $\cdot\, 6{,}426 \times$ $\times\, 10^{-4}$ мкЗв/ч $+\, 60$ ч $\cdot\, 9{,}008 \cdot 10^{-4}$ мкЗв/ч $+\, 30$ ч $\cdot\, 8{,}614 \cdot 10^{-4}$ мкЗв/ч $\approx$ $\approx 0{,}22$ мкЗв.

Аналогично для других детекторов суммарные годовые эффективные дозы при работе с приведенными в табл. 3 предельными интенсивностями не превысят установленных пределов для персонала.

При работе станции ИСКРА в любых режимах внутри домиков экспериментаторов наблюдаются менее жесткие спектры нейтронов в сравнении с результатами для работы станции СИМБО. При любом режиме работы станции ИСКРА наиболее щадящие условия (наиболее мягкие спектры нейтронов) для детекторов в области установки электроники наблюдаются в месте положения детектора «полка 4» (на уровне пола), а наиболее жесткие — на уровне пучка «полка 2», причем наихудшие условия создаются при облучении микросхемы в пике Брэгга (при работе станции в режиме № 1).

В год для станции ИСКРА на облучение в режиме № 1 отводится 290 ч, а в режимах № 2 и 3 — 180 ч, итого — 470 ч. Кроме того, планируется использовать настроечный режим 30 ч/год, для которого расчет произведен не был. Эти часы можно учесть, добавив их во второй режим,

при допущении, что режим настройки будет примерно соответствовать режимам № 2 и 3.

Аналогично станции СИМБО полученные результаты позволяют оценить суммарные эффективные дозы в детекторах за пределами измерительного павильона (DETAP, DETA, DETB), выбраны режимы работы станции ИСКРА с наибольшими значениями суммарных мощностей эффективных доз при определенных расчетным путем предельных интенсивностях $I_{\text{safe}}$:

• в режиме № 1 — это пучок висмута: $\dot{D}_{\text{DETAP},\Sigma} = 3{,}042 \times \times 10^{-3}$ мкЗв/ч, $\dot{D}_{\text{DETA},\Sigma} = 1{,}046 \cdot 10^{-3}$ мкЗв/ч, $\dot{D}_{\text{DETB},\Sigma} = 5{,}778 \times \times 10^{-5}$ мкЗв/ч;

• в режимах № 2 и 3 (+ настройка) — это пучок висмута (без сканирования, режим № 2): $\dot{D}_{\text{DETAP},\Sigma} = 3{,}032 \cdot 10^{-3}$ мкЗв/ч, $\dot{D}_{\text{DETA},\Sigma} = = 1{,}018 \times 10^{-3}$ мкЗв/ч, $\dot{D}_{\text{DETB},\Sigma} = 5{,}895 \cdot 10^{-5}$ мкЗв/ч.

Таким образом, суммарная эффективная доза за год при работе станции ИСКРА составит:

• для детектора DETAP: 290 ч $\cdot\, 3{,}042 \cdot 10^{-3}$ мкЗв/ч + 210 ч $\cdot\, 3{,}032 \times \times 10^{-3}$ мкЗв/ч $\approx 1{,}52$ мкЗв;

• для детектора DETA: 290 ч $\cdot\, 1{,}046 \cdot 10^{-3}$ мкЗв/ч + 210 ч $\cdot\, 1{,}018 \times \times 10^{-3}$ мкЗв/ч $\approx 0{,}52$ мкЗв;

• для детектора DETB: 290 ч $\cdot\, 5{,}778 \cdot 10^{-5}$ мкЗв/ч + 210 ч $\cdot\, 5{,}895 \times \times 10^{-5}$ мкЗв/ч $\approx 0{,}03$ мкЗв.

Аналогично для других детекторов годовые суммарные эффективные дозы при работе станции ИСКРА с приведенными в табл. 4 предельными интенсивностями не превысят установленных пределов для персонала.

Суммарная эффективная доза за год за пределами измерительного павильона при работе станций СИМБО и ИСКРА составит:

• для детектора DETAP: 5,21 мкЗв (СИМБО) + 1,52 мкЗв (ИСКРА) $\approx$ $\approx 6{,}73$ мкЗв;

• для детектора DETA: 2,33 мкЗв (СИМБО) + 0,52 мкЗв (ИСКРА) $\approx$ $\approx 2{,}85$ мкЗв;

• для детектора DETB: 0,22 мкЗв (СИМБО) + 0,03 мкЗв (ИСКРА) $\approx$ $\approx 0{,}25$ мкЗв.

Работа станции СИМБО вносит определяющий вклад в суммарные эффективные дозы за пределами измерительного павильона (в рассматриваемых детекторах DETAP, DETA, DETB).

Суммарная эффективная доза внутри измерительного павильона составит не более 4,8 мЗв при работе обеих станций для всех критических детекторов, обозначенных в табл. 4 и 3.

Таким образом, полученные оценки позволяют заключить, что при использовании предельных интенсивностей, определенных в результате моделирования (см. табл. 4 и 3), пределы допустимых для персонала и населения доз при работе станций ИСКРА и СИМБО не будут превышены.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Slivin A., Agapov A., Butenko A., Filatov G., Shipulin K., Syresin E., Tuzikov A., Kulevoy T., Titarenko Y., Bobrovskiy D., Chumakov A., Soloviev S., Kubankin A., Chernykh P., Luzanov V.* Construction of Stations for Applied Research at the NICA Accelerator Complex // Phys. Part. Nucl. Lett. 2022. V. 19, No. 5. P. 528–531.
2. *Filatov G., Slivin A., Syresin E., Butenko A., Vorozhtsov A., Agapov A., Shipulin K., Kolesnikov S., Karpinskii V., Kuznetsov M., Kirov S., Sergeev A., Galimov A., Tikhomirov A., Tyulkin V., Letkin D., Leushin D., Tuzikov A.* Progress on New Beam Lines Design and Construction for Applied Research at NICA // Ibid. P. 513–516.
3. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 26.04.2010. https://web-docs.gsi.de/ weick/atima/.
4. *Battistoni G., Boehlen T., Cerutti F., Pik Wai Chin, Esposito L. S., Fassó A., Ferrari A., Lechner A., Empl A., Mairani A., Mereghetti A., Ortega P. G., Ranft J., Roesler S., Sala P. R., Vlachoudis V., Smirnov G.* Overview of the FLUKA Code // Ann. Nucl. Energy. 2015. V. 82. P. 10–18.
5. *Ahdida C., Bozzato D., Calzolari D., Cerutti F., Charitonidis N., Cimmino A., Coronetti A., D'Alessandro G. L., Donadon Servelle A., Esposito L. S., Froeschl R., Garcia Alia R., Gerbershagen A., Gilardoni S., Horváth D., Hugo G., Infantino A., Kouskoura V., Lechner A., Lefebvre B., Lerner G., Magistris M., Manousos A., Moryc G., Ogallar Ruiz F., Pozzi F., Prelipcean D., Roesler S., Rossi R., Sabaté Gilarte M., Salvat Pujol F., Schoofs P., Stránský V., Theis C., Tsinganis A., Versaci R., Vlachoudis V., Waets A., Widorski M.* New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code // Front. Phys. 2022. V. 9. P. 1–14.
6. DMAMC. Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling. https://www.osti.gov/servlets/purl/1782721. 2021. P. 280.
7. ATIMA Program. https://web-docs.gsi.de/ weick/atima/.
8. *Petoussi-Henss N., Bolch W. E., Eckerman K. F., Endo A., Hertel N., Hunt J., Pelliccioni M., Schlattl H., Zankl M.* ICRP Publication 116. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures // Ann. ICRP. 2010. V. 40. P. 1–257.