

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.382

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЧАСТОТ И
СЕЧЕНИЙ ОДИНОЧНЫХ СБОЕВ В МИКРОСХЕМАХ
ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С РАЗЛИЧНЫМИ СПЕКТРАЛЬНО-
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

©2026 г. В. В. Емельянов^а, А. С. Петров^{а*}, Д. М. Бакеренкова^а,
М. В. Баньковский^а, А. Э. Земцов^{а, b, **}, М. С. Петров^а,
М. А. Тюрников^а, Р. Г. Усеинов^а, С. А. Филатов^а

^аНаучно-исследовательский институт приборов

Россия, 140080, Лыткарино Московской обл., промзона Тураево, стр. 8

^bНациональный исследовательский технологический университет “МИСИС”

Россия, 119049, Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

*E-mail: ASPetrov@niipribor.ru

**E-mail: m1705366@edu.misis.ru

Поступила в редакцию 04.05.2026

После доработки 17.08.2026

Принята к публикации 27.08.2026

Представлены результаты экспериментальных исследований возникновения одиночных сбоев в микросхемах СОЗУ и флеш-памяти при воздействии моноэнергетических нейтронов, нейтронов спектра деления, нейтронов со спектром, близким к спектру “атмосферных” нейтронов, и при воздействии протонов с энергией 1 ГэВ. Приведены практические примеры расчета сечений одиночных сбоев для условий воздействия нейтронов с различными спектрально-энергетическими характеристиками по результатам экспериментов на моноэнергетических источниках нейтронов и протонов.

Ключевые слова: одиночный радиационный эффект, сечение одиночных сбоев, нейтронное излучение, статическое оперативное запоминающее устройство, флеш-память

1. ВВЕДЕНИЕ

Возможность возникновения одиночных сбоев в микросхемах запоминающих устройств при воздействии нейтронного излучения была подтверждена экспериментально достаточно давно [1]. Данное явление привлекло к себе внимание, прежде всего, с точки

зрения обеспечения устойчивости работы авиационной электроники, которая на борту летательного аппарата в процессе полета подвергается воздействию так называемых “атмосферных” нейтронов [2] с повышенной плотностью потока. Указанная проблема является актуальной и в настоящее время. Например, известно, что после расследования очередного авиационного происшествия, произошедшего в октябре 2025 года, специалисты компании Airbus пришли к заключению, что текущая версия программного обеспечения, управляющего оборудованием контроля полета самолетов семейства A320, была недостаточно устойчива к сбоям в микросхемах запоминающих устройств от “атмосферных” нейтронов [3]. Существуют и другие условия применения электронного оборудования, для которых характерно воздействие нейтронного излучения с повышенной плотностью потока. Отметим, что для разнообразных условий эксплуатации электронного оборудования нейтронное излучение может иметь существенно различные спектрально-энергетические и амплитудно-временные характеристики.

Процедура определения чувствительности полупроводниковых изделий электронной техники к одиночным радиационным эффектам и одиночным сбоям, в частности, является одной из важных и необходимых процедур при создании радиоэлектронной аппаратуры, стойкой к воздействию ионизирующего излучения. В части одиночных радиационных эффектов, возникающих при воздействии нейтронного излучения, наиболее проработанными являются методы определения чувствительности интегральных микросхем к одиночным сбоям от “атмосферных” нейтронов. Например, стандарт JESD89, разработанный ассоциацией JEDEC, для решения данной задачи регламентирует два основных метода [4]. Первый метод основан на проведении ускоренных испытаний образцов интегральных микросхем в наземных лабораторных условиях на установках, воспроизводящих спектр нейтронов, близкий к спектру “атмосферных” нейтронов. В Российской Федерации такая установка была создана на протонном синхроциклотроне СЦ-1000, НИЦ “Курчатовский институт”–ПИЯФ, г. Гатчина (установка ГНЕЙС). Второй метод предполагает получение экспериментальных данных о сечении одиночных сбоев в образцах интегральных микросхем при нескольких энергиях моноэнергетических источников нейтронов и проведение последующего расчета частоты одиночных сбоев для условий воздействия нейтронного излучения заданного спектрально-энергетического состава. При этом для воспроизведения эффекта от воздействия нейтронов в диапазоне энергий выше 100 МэВ может быть использовано моноэнергетическое протонное излучение. Следует отметить, что последний метод может быть использован для определения чувствительности интегральных микросхем к одиночным сбоям, возникающим при воздействии нейтронного излучения практически любого спектрально-энергетического состава.

В рамках настоящей работы были проведены экспериментальные исследования по определению сечений одиночных сбоев в микросхемах статических оперативных запоминающих устройств (СОЗУ) и флеш-памяти при воздействии моноэнергетических нейтронов с энергиями 2.5 и 14 МэВ, нейтронов спектра деления, нейтронов со спектром, близким к спектру “атмосферных” нейтронов, и при воздействии протонов с энергией 1 ГэВ. На основе данных, полученных в экспериментах на моноэнергетических источниках нейтронов и протонов, были проведены расчеты сечений одиночных сбоев для условий воздействия нейтронов со спектрально-энергетическими характеристиками, соответствующими спектру деления и спектру “атмосферных” нейтронов. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными по сечениям возникновения одиночных сбоев.

2. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

В качестве источников нейтронов использовались испытательные установки, указанные в табл. 1.

Таблица 1. Источники нейтронов, использованные в экспериментальных исследованиях

Наименование установки	Режим работы	Название организации-владельца установки
Генератор нейтронов НГ-12И	Вывод нейтронов с энергией 2.5 МэВ	РФЯЦ–ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина, г. Снежинск
	Вывод нейтронов с энергией 14 МэВ	
Ядерный реактор БАРС-5	Статический	
Синхроциклотрон СЦ-1000	Вывод протонов с энергией 1 ГэВ	НИЦ “Курчатовский институт”–ПИЯФ, г. Гатчина
Установка ГНЕЙС на синхроциклотроне СЦ-1000	Вывод атмосферных нейтронов	

Погрешности определения флюенса частиц при проведении экспериментов на использованных испытательных установках были следующими: 10% – генератор нейтронов НГ-12И, 10% – ядерный реактор БАРС-5, 15% – синхроциклотрон СЦ-1000, 7% – установка ГНЕЙС на синхроциклотроне СЦ-1000. На рис. 1 представлены плотности распределений энергии нейтронов для нейтронного излучения ядерного реактора БАРС-5 и установки ГНЕЙС на синхроциклотроне СЦ-1000.

Рис. 1. Плотности распределений энергии нейтронов для нейтронного излучения ядерного реактора БАРС-5 (сплошная линия) и установки ГНЕЙС на синхроциклотроне СЦ-1000 (штриховая линия)

3. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследований являлись образцы микросхем статических оперативных запоминающих устройств (СОЗУ) K6R4016V1D-UI10 и IS62WV25616BLL-55TLI, а также образцы микросхемы флеш-памяти MT29F1G08ABADAWP. В табл. 2 приведены основные характеристики исследованных микросхем. На каждой из испытательных установок (см. табл. 1) облучалось от 1 до 3 образцов микросхем указанных типов.

Таблица 2. Характеристики микросхем, использованных в экспериментальных исследованиях

Название микросхемы	Функция	Производитель	Емкость, Мбит	Технология, нм
K6R4016V1D-UI10	СОЗУ	Samsung	4	180
IS62WV25616BLL-55TLI	СОЗУ	ISSI	4	130
MT29F1G08ABADAWP	Флеш-память типа NAND	Micron Technology	1000	20

В процессе обучения образцов микросхем СОЗУ выполнялась процедура функционального контроля, которая заключалась в циклическом выполнении специальной последовательности процедур побайтового чтения и записи информации в матрицу СОЗУ, а именно, в циклическом выполнении алгоритма типа “Марш”. Алгоритм функционального контроля может быть представлен в виде следующей логической записи:

$$\Downarrow wX; \{\Downarrow(rX, wY, rY); \Downarrow(rY, wX, rX)\}, \quad (1)$$

где $\Downarrow$ – направление изменения адреса (от большего к меньшему), wX (wY) – операция записи значения X (Y) в СОЗУ по требуемому адресу, rX (rY) – операция чтения байта, содержащего значение X (Y) (ожидаемое значение при чтении).

При проведении функционального контроля значение X принималось равным 5555h (0101010101010101bin), а значение Y – равным AAAAh (1010101010101010bin). Отметим, что функциональный контроль проводился в режиме двухбайтового ввода–вывода данных. Операция инициализации ($\Downarrow wX$) выполнялась перед началом облучения, а операции $\{\Downarrow(rX, wY, rY); \Downarrow(rY, wX, rX)\}$ – непрерывно в процессе всего облучения. Время опроса всей матрицы СОЗУ в процессе функционального контроля составляло 1.8 с. Как правило, в каждом сеансе облучения выполнялось от тысячи до десяти тысяч циклов опроса матрицы СОЗУ. При проведении функционального контроля регистрировались несанкционированные изменения состояния запоминающих ячеек матрицы (ошибки), при этом фиксировался адрес байта данных с измененным состоянием ячеек, фиксировалась информация в данном байте, определялось число “ошибочных” разрядов в байте и подсчитывалось полное количество ячеек с измененными состояниями (ошибок) с нарастающим итогом.

Методика исследований одиночных радиационных эффектов в образцах микросхемы флеш-памяти MT29F1G08ABADAWP заключалась в следующем. До начала проведения облучений в матрицу-накопитель образцов микросхемы флеш-памяти MT29F1G08ABADAWP записывалась информация, представляющая собой код в виде “все 1”, “все 0”, “шахматное поле” (1-й байт 01010101b, 2-й байт 10101010b и т.д.) и “инверсное шахматное” поле (1-й байт 10101010b, 2-й байт 01010101b и т.д.). Каждое из указанных информационных полей записывалось в один из четырех равных по информационной емкости секторов матрицы запоминающего устройства образца микросхемы. Воздействие нейтронов и протонов на образцы микросхемы MT29F1G08ABADAWP проводилось в режиме хранения записанной информации без подачи электропитания. После проведения облучения с требуемым уровнем флюенса нейтронов или протонов проводились чтение информации, хранимой в матрице запоминающего устройства, и сравнение считанной информации с изначально записанными данными. По результатам сравнения регистрировались несанкционированные изменения состояния ячеек матрицы запоминающего устройства, выявленные на этапе сравнения. После процедуры сравнения проводилась проверка сохранения функциональной работоспособности ячеек матрицы путем процедуры записи-чтения.

В процессе исследований образцов микросхем СОЗУ K6R4016V1D-UI10 и IS62WV25616BLL-55TLI во всех режимах работы установок НГ-12И, БАРС-5, ГНЕЙС и СЦ-1000 были зарегистрированы случайно расположенные в байтовом адресном пространстве несанкционированные изменения состояний ячеек матрицы запоминающего устройства (ошибки), соответствующие переходам как из состояния “0” в состояние “1”, так и из состояния “1” в состояние “0”. Распределение ошибок по разрядам в байтовых словах также носило случайный характер. Данные события интерпретировались как возникновение одиночных сбоев, и для каждого режима работы испытательных установок (см. табл. 1) рассчитывалось усредненное сечение сбоев (σ_{oc}) по формуле

$$\sigma_{oc} = \frac{1}{M} \frac{\sum_i N_i}{\sum_i \Phi_i}, \quad (2)$$

где M – информационная емкость матрицы запоминающего устройства, i – номер сеанса облучения в соответствующем режиме работы испытательной установки, N_i – число ошибок в соответствующем сеансе облучения, Φ_i – флюенс нейтронов или протонов в соответствующем сеансе облучения.

Следует отметить, что при облучении на установках ГНЕЙС и СЦ-1000 в образцах микросхемы IS62WV25616BLL-55TLI кроме одиночных сбоев наблюдались и другие одиночные радиационные эффекты, приводящие к возникновению ошибок в матрице

запоминающего устройства. Так, например, в сеансах облучения на установке ГНЕЙС усредненное по всем циклам опроса количество зарегистрированных ошибок в одном цикле составило величину существенно меньше 1, однако из выполненных более чем 20 тысяч циклов опроса матрицы в 7 циклах опроса были зарегистрированы ошибки в количестве от 16 до 226 ошибок в цикле (“массовые” ошибки). Распределение количества циклов опроса по количеству ошибок представлено в табл. 3. Кроме того, в пределах одного цикла опроса все ошибки в указанных 7 циклах с “массовыми” ошибками фиксировались в одном и том же разряде байтового слова.

Таблица 3. Распределение количества циклов опроса по количеству ошибок в сеансах облучения образцов микросхемы IS62WV25616BLL-55TLI на установке ГНЕЙС

Количество ошибок в цикле опроса	0	1	2	16	32	80	107	193	213	226
Количество циклов опроса	Более $2 \cdot 10^4$	366	19	1	1	1	1	1	1	1

Представленное описание характера наблюдаемых “массовых” ошибок позволяет сделать вывод, что механизм возникновения данных ошибок существенно отличается от механизма возникновения одиночных сбоев и что этот механизм представляет собой одиночный радиационный эффект другого типа, возможно, сбой в шине данных или локальный одиночный тиристорный эффект. При расчете величины σ_{oc} количество “массовых” ошибок вычиталось из общего количества зарегистрированных ошибок.

В процессе исследований образцов микросхемы флеш-памяти MT29F1G08ABADAWP после облучения образцов на установках НГ-12И, БАРС-5, ГНЕЙС и СЦ-1000 были зарегистрированы несанкционированные изменения состояний ячеек матрицы запоминающего устройства (ошибки), соответствующие переходам только из состояния “0” в состояние “1”. Распределения ошибок по адресам байтов и по разрядам в байтовых словах носили случайный характер. Данные ошибки интерпретировались как одиночные сбои, и для каждого режима работы испытательных установок НГ-12И, БАРС-5, ГНЕЙС и СЦ-1000 рассчитывалась величина σ_{oc} по формуле (2). При расчете σ_{oc} величина M принималась равной половине информационной емкости матрицы запоминающего устройства, что соответствовало количеству запоминающих ячеек, находящихся при облучении в состоянии “0”.

Обобщенные данные по сечениям одиночных сбоев (σ_{oc}), полученные на основе экспериментальных результатов исследований, приведены в табл. 4, 5.

Таблица 4. Экспериментальные значения сечений одиночных сбоев в микросхемах запоминающих устройств, полученные при воздействии моноэнергетических источников нейтронов и протонов

Тип ЗУ	Нейтроны с энергией 2.5 МэВ	Нейтроны с энергией 14 МэВ	Протоны с энергией 1000 ГэВ
КМОП СОЗУ K6R4016V1D-UI10	$2.5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{бит}$	$1.9 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{бит}$	$2.9 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{бит}$
КМОП СОЗУ IS62WV25616BLL-55TLI	$3.85 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2/\text{бит}$	$6.05 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{бит}$	Не выделены*
Флеш-память MT29F1G08ABADAWP	$1.3 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2/\text{бит}$	$2.8 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2/\text{бит}$	$7.4 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2/\text{бит}$

*Вследствие высокой плотности потока протонов при облучении выделение одиночных сбоев на фоне событий с “массовым” возникновением ошибок не представлялось возможным

4. ОЦЕНКА ЧАСТОТЫ И СЕЧЕНИЯ ОДИНОЧНЫХ СБОЕВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С РАЗЛИЧНЫМИ СПЕКТРАЛЬНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

В общем случае частота одиночных сбоев, возникающих в запоминающих устройствах при воздействии нейтронного излучения (ν_{oc}), может быть рассчитана по следующей формуле:

$$\nu_{oc} = \varphi_n \int_{E_{n_min}}^{E_{n_max}} \sigma_{oc}(E_n) p(E_n) dE_n, \quad (3)$$

где φ_n – плотность потока нейтронов, E_n – энергия нейтронов, E_{n_min} – минимальная энергия быстрых нейтронов в спектре источника нейтронов, для которого проводится расчет (как правило, она принимается равной 0.1 МэВ), E_{n_max} – максимальная энергия нейтронов в спектре источника нейтронов, для которого проводится расчет, $\sigma_{oc}(E_n)$ – зависимость сечения одиночных сбоев от энергии нейтронов, $p(E_n)$ – плотность распределения энергии нейтронов.

Для сравнения экспериментальных и расчетных результатов формулу (3) удобно представить в виде

$$\nu_{oc} = \varphi_n \sigma_{oc}, \quad (4)$$

где величина

$$\sigma_{oc} = \int_{E_{n_min}}^{E_{n_max}} \sigma_{oc}(E_n) p(E_n) dE_n \quad (5)$$

имеет физический смысл сечения одиночных сбоев для нейтронного излучения с заданной спектрально-энергетической характеристикой. При наличии соответствующего источника нейтронов величина σ_{oc} может быть определена экспериментально.

Для моноэнергетического нейтронного излучения частота одиночных сбоев рассчитывается по формуле

$$\nu_{oc} = \varphi_n \sigma_{oc}(E_n). \quad (6)$$

В настоящей работе была проведена расчетно-экспериментальная оценка сечений одиночных сбоев, возникающих в микросхемах статических СОЗУ K6R4016V1D-UI10 и IS62WV25616BLL-55TLI и микросхемы флеш-памяти MT29F1G08ABADAWP при воздействии нейтронов со спектрально-энергетическими характеристиками, соответствующими спектру деления и спектру “атмосферных” нейтронов, по экспериментальным данным о сечениях одиночных сбоев для энергий нейтронов с энергиями 2.5 МэВ и 14 МэВ, а также протонов с энергией 1 ГэВ. Расчеты сечений для нейтронов спектра деления и спектра “атмосферных” нейтронов проводились по формуле (5). Зависимость $\sigma_{oc}(E_n)$ была определена с помощью аппроксимации экспериментальных данных, представленных в табл. 4, функцией вида

$$\sigma_{oc}(E_n) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{10E_0}{E_n}\right), \quad (7)$$

где σ_0 и E_0 – параметры функции аппроксимации.

Пример аппроксимации зависимости сечений одиночных сбоев от энергии нейтронов с помощью функции (7) показан на рис. 2.

Рис. 2. Зависимость сечения одиночных сбоев в СОЗУ K6R4016V1D-UI10 от энергии нейтронов...

При проведении расчетов сечений были использованы функции плотности распределений энергий нейтронов, представленные на рис. 1. Вычисление интеграла (5) проводилось численно методом трапеций. Результаты расчета сечений одиночных сбоев, возникающих в микросхемах статических СОЗУ K6R4016V1D-UI10 и IS62WV25616BLL-55TLI и микросхемы флеш-памяти MT29F1G08ABADAWP при воздействии нейтронов со спектрально-энергетическими характеристиками, соответствующими спектру деления и спектру “атмосферных” нейтронов, приведены в табл. 5.

Таблица 5. Экспериментальные и расчетные значения сечений одиночных сбоев в микросхемах запоминающих устройств, соответствующие воздействию нейтронов со спектрами установок БАРС-5 и ГНЕЙС

Тип ЗУ	БАРС-5		ГНЕЙС	
	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
КМОП СЗУ K6R4016V1D-UI10	$0.96 \cdot 10^{-14}$ см ² /бит	$1.35 \cdot 10^{-14}$ см ² /бит	$0.99 \cdot 10^{-13}$ см ² /бит	$1.0 \cdot 10^{-13}$ см ² /бит
КМОП СЗУ IS62WV25616BLL-55TLI	$3.4 \cdot 10^{-5}$ см ² /бит	$2.7 \cdot 10^{-15}$ см ² /бит	$2.5 \cdot 10^{-14}$ см ² /бит	$3.35 \cdot 10^{-14}$ см ² /бит
Флеш-память MT29F1G08ABADAWP	$1.1 \cdot 10^{-20}$ см ² /бит	$1.8 \cdot 10^{-20}$ см ² /бит	$(5.4 \pm 2.7) \cdot 10^{-19}$ см ² /бит*	$6.6 \cdot 10^{-19}$ см ² /бит

* В экспериментах на установке ГНЕЙС в образцах флеш-памяти MT29F1G08ABADAWP было зарегистрировано только 4 одиночных сбоя. Указанная погрешность соответствует среднеквадратичной ошибке для распределения Пуассона

Оценка частоты возникновения одиночных сбоев при воздействии нейтронов со спектрами установок БАРС-5 и ГНЕЙС может быть получена путем умножения значений сечений одиночных сбоев, приведенных в табл. 5, на соответствующую плотность потока нейтронов.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение экспериментальных и расчетных результатов, приведенных в настоящей статье, показывает, что для всех рассмотренных случаев различие между значениями сечений, полученными экспериментально и с помощью расчета, не превышает 1.5 раз. Расчетный результат, как правило, оказывается более консервативным, т.е. дает большее значение для сечения одиночных сбоев. С точки зрения достоверности результатов прогнозирования, данная ситуация является типичной для большинства методов, которые используются для прогнозирования частот одиночных радиационных эффектов в реальных условиях эксплуатации по результатам лабораторных испытаний [5]. Учитывая, что величины сечений одиночных сбоев для нейтронных излучений установок БАРС-5 и ГНЕЙС различаются на порядок и более, соответствие экспериментальных и расчетных значений сечений в пределах до 1.5 раз можно признать удовлетворительным.

Отметим также, что все расчетные результаты были получены с использованием однотипной аппроксимирующей функции (7). Как правило, функция вида (7) хорошо аппроксимирует зависимость сечения одиночных сбоев от энергии нейтронов, и данный вид функции может быть рекомендован как типовой при проведении расчетов по изложенной в данной работе методике. Представленная в настоящей работе методика может быть

рекомендована для оценки показателей стойкости изделий электронной техники к воздействию нейтронного излучения в части одиночных радиационных эффектов различных типов. Однако данная оценка должна проводиться для каждого типа одиночного радиационного эффекта отдельно, а сам эффект должен быть надежно идентифицирован и выявлен в отклике изделия на воздействие моноэнергетического нейтронного излучения лабораторных источников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Guenzer C.S., Wolicki E.A., Allas R.G.* IEEE Trans. Nucl. Sci. 1979. V. 26. № 6. P. 5048.
<https://doi.org/10.1109/TNS.1979.4330270>
2. *Normand E.* IEEE Trans. Nucl. Sci. 1996. V. 43. № 2. P. 461. <https://doi.org/10.1109/23.490893>
3. *Gomez G.* Thousands of Airbus A320s could be grounded after safety alert. Business Traveller, URL: <https://www.businesstraveller.com/news/airbus-a320s-potential-grounding/>
4. JESD89, Measurement and Reporting of Alpha Particles and Terrestrial Cosmic Ray-Induced Soft Errors in Semiconductor Devices. JEDEC Standard, JEDEC Solid State Technology Association, August 2001.
5. *Hansen D.L., Manich T., Zavatkey I.* IEEE Trans. Nucl. Sci. 2025. V. 72. № 4. P. 1021.
<https://doi.org/10.1109/TNS.2024.3451312>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Плотности распределений энергии нейтронов для нейтронного излучения ядерного реактора БАРС-5 (сплошная линия) и установки ГНЕЙС на синхроциклотроне СЦ-1000 (штриховая линия)

Рис. 2. Зависимость сечения одиночных сбоек в СОЗУ К6R4016V1D-UI10 от энергии нейтронов: точки – экспериментальные данные из табл. 3, линия – аппроксимация функцией (7), $E_0=0.62$ МэВ, $\sigma_0=3\cdot 10^{-13}$ см⁻²/бит. Определение параметров E_0 и σ_0 проводилось методом наименьших квадратов

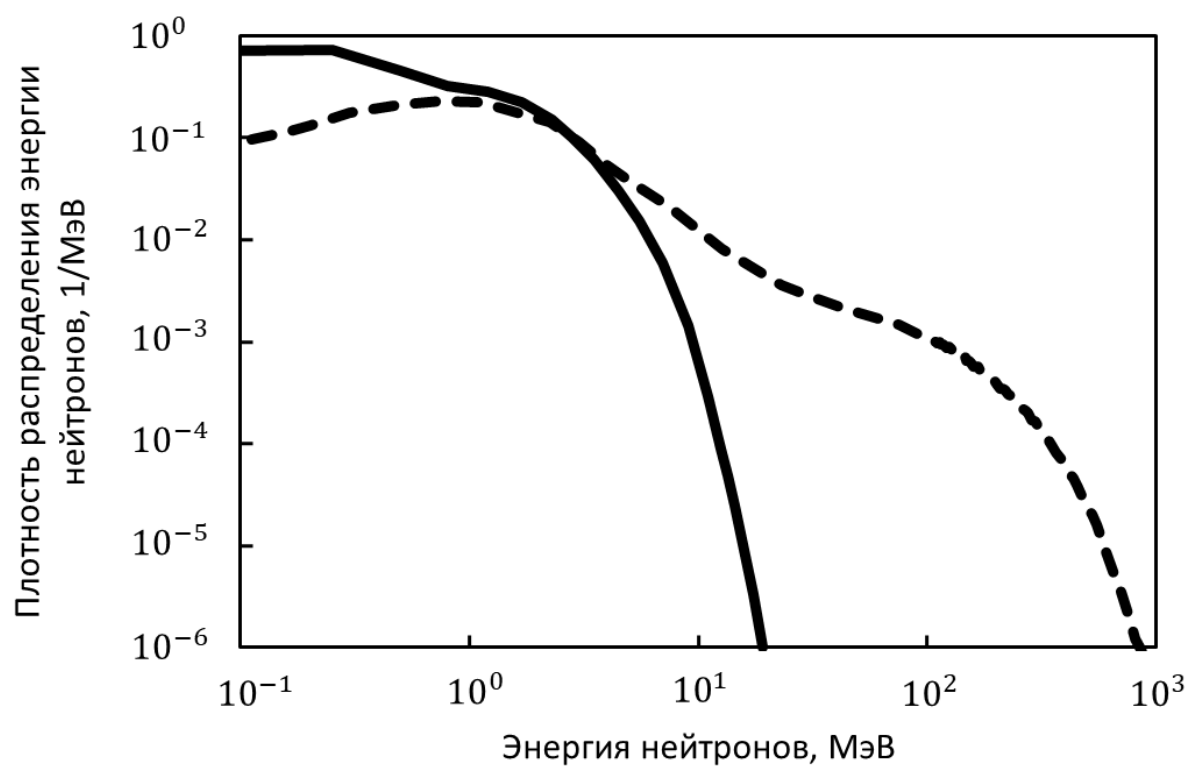


Рис. 1.

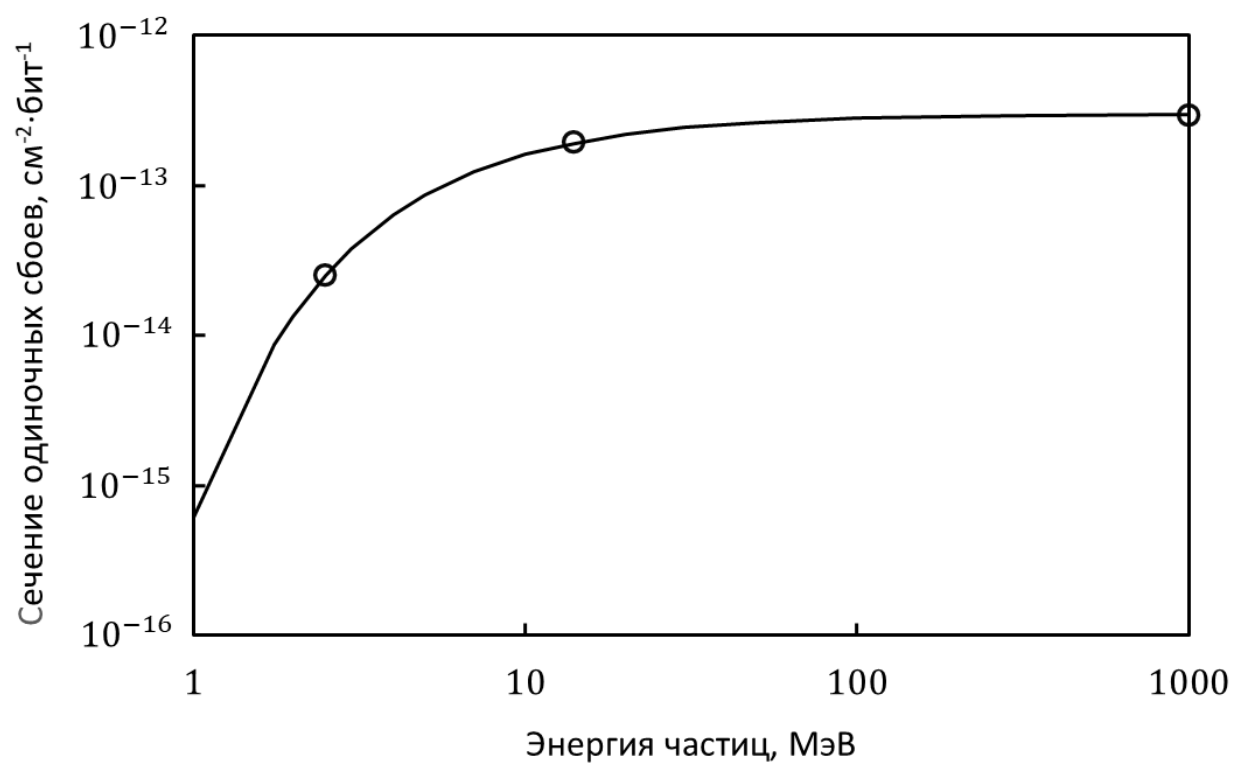


Рис. 2.