

Расчёт мощности эквивалентной дозы внешнего облучения кожи $\dot{H}_p(0,07)$ от бета- и гамма-излучения уранового стеклянного бисера

Расчёт мощности эквивалентной дозы в коже методом Монте-Карло (Geant4) при контакте с чешским урановым бисером «жёлтый опал 6/0». Измеренные удельные активности ^{238}U $2,27 \cdot 10^5$ Бк/кг, ^{235}U $9,9 \cdot 10^3$ Бк/кг; уран очищенный — вековое равновесие ряда нарушено, гамма-активные дочерние продукты радиевого звена отсутствуют. Три конфигурации укладки, сферическая геометрия бусины. Мощность эквивалентной дозы внешнего облучения кожи $\dot{H}_p(0,07)$ на контакте — от $6,7 \pm 0,7$ (одна бусина) до 48 ± 5 мкЗв/ч (плотный коврик), практически целиком за счёт бета-излучения.

К статье прилагается **интерактивный калькулятор с трёхмерной визуализацией**: произвольная геометрия раскладки, содержание урана в стекле и размер бусин; модель откалибрована по опорным точкам настоящего расчёта (среднеквадратичное отклонение 0,7 %).

Расчёт выполнен ИИ-агентом (Anthropic Claude) под руководством и контролем оператора; результаты прошли независимый аудит кода. Подробнее — §11 «Заявление об использовании ИИ».

⚠ Ограничение ответственности и необходимость независимой проверки.

Материал носит информационно-справочный и демонстрационный характер. Приведённые величины — результат численного (Монте-Карло) моделирования и упрощённых аналитических моделей, которые **могут содержать методические ошибки, неточности исходных данных и допущений**; итоговые оценки **не являются метрологически аттестованными измерениями**. Материал **не заменяет** официальную дозиметрию, аттестованный расчёт и заключение уполномоченных специалистов по радиационной безопасности и **не должен использоваться как единственное основание** для решений, влияющих на здоровье, безопасность или соответствие нормативам. Перед любым практическим применением результаты подлежат **независимой проверке квалифицированными специалистами** и, при необходимости, прямому измерению аттестованными приборами. Авторы и оператор не дают гарантий полноты и точности и не несут ответственности за последствия использования сведений; использование информации — на собственный риск читателя.

Образец. Чешский урановый стеклянный бисер «Бисер жёлтый опал, урановое стекло 6/0, 4,1 мм» (арт. 31119001/0 8200). Масса бусины 63,96 мг (14,710 г / 230 шт). Измерены удельные активности: ^{238}U $2,27 \cdot 10^5$ Бк/кг (18,37 г/кг), ^{235}U $9,90 \cdot 10^3$ Бк/кг (0,1237 г/кг); обогащение по ^{235}U 0,67 % — практически природное. В стекле — флюоресценция церия (обесцвечиватель CeO_2), барий отсутствует.

Источник. Уран в стекле химически очищенный, содержание радия минимально: вековое равновесие ряда ^{238}U нарушено на ^{226}Ra , поэтому гамма-активные продукты радиевого звена (^{214}Pb , ^{214}Bi) в стекле отсутствуют. Эквивалентную дозу в коже формируют короткоживущие дочерние нуклиды первых звеньев цепочек распада, восстановившие вековое равновесие с ураном за месяцы после варки, — прежде всего высокоэнергетическая β -частица $^{234\text{m}}\text{Pa}$ (E_{max} 2,27 МэВ).

Метод. Geant4 11.2.1[9], электромагнитная физика G4EmStandardPhysics_option4 и модуль радиоактивного распада G4RadioactiveDecay[11]; источник распределён по объёму стекла (учтено самопоглощение бета-частиц), сферическая бусина в контакте с фантомом «кожа + прилегающие ткани» (слоистая мягкая ткань ICRU[8]). Целевая величина — **мощность эквивалентной дозы внешнего облучения кожи $\dot{H}_p(0,07)$** (мощность персонального эквивалента дозы на глубине 0,07 мм $\equiv$ 7 мг/см², т.е. базального слоя эпидермиса), усреднённая по площади 1 см² по определению ICRP/ICRU[6]; в расчёте она берётся как среднее по глубине 50–100 мкм. Нормировка проверена санити-тестом (отношение к аналитическому закону обратных квадратов 1,000).

Результат. Мощность эквивалентной дозы внешнего облучения кожи $\dot{H}_p(0,07)$ (базальный слой, контакт вплотную): **одна бусина $6,7 \pm 0,7$ мкЗв/ч, цепочка 18 ± 2 мкЗв/ч, плотный коврик 48 ± 5 мкЗв/ч** (статистическая погрешность < 1 %; приведённая погрешность $\pm$ отражает неопределённость плотности стекла ± 10 %). Форма бусины даёт дополнительную одностороннюю систематику вверх: сферическая модель — консервативная нижняя оценка, истинное значение для одиночной бусины до $\sim +34$ % (полный бюджет в §4). Вклад фотонов < 0,2 %; из энергии бета-частиц 55–67 % поглощается в самом стекле. При обычном обращении доза остаётся в пределах норматива для населения (предел эквивалентной дозы в коже — 50 мЗв/год[7]); заметная доза набирается лишь при многочасовом ежедневном контакте вплотную.

Ключевые слова: урановое стекло; природные радионуклиды (NORM); очищенный уран; нарушение векового равновесия; $^{234\text{m}}\text{Pa}$; доза в коже; бета-дозиметрия; эффект «горячей частицы»; Монте-Карло; Geant4; потребительские изделия с радиоактивностью.

1 Образец и постановка

Урановое стекло — силикатное стекло, окрашенное соединениями урана (обычно 0,1–2 масс.% U, исторически до десятков процентов); ему свойственны жёлто-зелёная окраска и яркая зелёная флюоресценция[1]. В исследуемом бисере измеренная массовая доля урана составляет **1,85 %** (18,37 г ^{238}U + 0,124 г ^{235}U на кг стекла). Наблюдаемая флюоресценция церия и отсутствие бария указывают на введение в стекломассу оксида церия CeO_2 — распространённого обесцвечивателя стекла: церий

действует не как краситель, а как окислитель, переводящий примесное железо Fe^{2+} (сильный сине-зелёный краситель) в Fe^{3+} (слабый жёлтый) и тем снимая нежелательный оттенок[2]. Типичные вводимые доли CeO_2 — 0,025–0,2 масс. %[26]; в расчёте принято ~0,5 % (верхняя оценка, на перенос β/γ не влияет, §3).

Цель работы — оценить **мощность эквивалентной дозы и дозу в коже от бета- и гамма-излучения** при непосредственном контакте бисера с кожей, для трёх сценариев обращения: (а) одна бусина, (б) цепочка бусин (нить, браслет), (в) плотная однорядная укладка — «коврик» (вышивка, плотное низание бисером). Доза нормируется на **базальный слой эпидермиса** (глубина 50–100 мкм, $\approx 5\text{--}10\text{ мг/см}^2$), усреднённой по площади 1 см^2 — стандартное определение эквивалентной дозы в коже[6][7].

2 Радионуклидный состав источника

По данным о происхождении стекла уран в нём **химически очищенный** (обеднённый либо природный, с минимальным содержанием радия). Химическая очистка урана отделяет продукты его распада, вследствие чего **вековое равновесие ряда ^{238}U оказывается нарушенным на ^{226}Ra** . За время жизни изделия (десятилетия) ^{226}Ra из ^{230}Th практически не восстанавливается: период полураспада ^{230}Th — 75 584 года[3]. Поэтому радий и последующие члены ряда отсутствуют — а именно **^{214}Pb и ^{214}Bi** , дающие в радийсодержащем материале проникающие гамма-линии 352 / 609 / 1120 / 1764 кэВ[4].

Присутствуют и излучают только короткоживущие дочерние нуклиды **первых звеньев** цепочек распада ^{238}U и ^{235}U , восстановившие вековое равновесие с материнским ураном за месяцы после варки стекла:

Таблица 1. Излучающие нуклиды очищенного урана. Данные распада ($T_{1/2}$, β -эндпоинты, γ -линии) — IAEA Live Chart of Nuclides[3] (ENSDF-оценка, получены через API), библиотека ICRP-107[4] в расчёте. Мощность эквивалентной дозы рассчитывается по двум непересекающимся цепочкам ($A = 234$ и $A = 235$), а не по отдельным нуклидам (см. §3).

Нуклид	Уд. активность, Бк/кг	На 1 бусину, Бк	Излучение, значимое для кожи
Цепочка $A = 234$ (из ^{238}U)			
^{234}Th	$2,27 \cdot 10^5$	14,52	β , $E_{\text{max}} \sim 199\text{ кэВ}$ + γ 63/93 кэВ
$^{234\text{m}}\text{Pa}$	$2,27 \cdot 10^5$	14,52	β, $E_{\text{max}} 2,27\text{ МэВ}$ (доминирующий вклад)
Цепочка $A = 235$ (из ^{235}U)			
^{235}U	$9,90 \cdot 10^3$	0,633	γ 143/163/185/205 кэВ + α
^{231}Th	$9,90 \cdot 10^3$	0,633	β $E_{\text{max}} \sim 389\text{ кэВ}$ + γ 25–84 кэВ
Не дают дозы в коже			

Нуклид	Уд. активность, Бк/кг	На 1 бусину, Бк	Излучение, значимое для кожи
^{238}U , ^{234}U	$2,27 \cdot 10^5$	—	α (тормозится в стекле; пробег в ткани < мёртвого слоя)
Ra-226 → Bi-214	≈ 0	—	проникающая γ -ряда — отсутствуют (очистка)

Доминирующий вклад в эквивалентную дозу в коже даёт бета-излучение — в первую очередь высокоэнергетическая β -частица $^{234\text{m}}\text{Pa}$ (E_{max} 2,27 МэВ), пробивающая мёртвый роговой слой кожи (~70 мкм, 7 мг/см²) и облучающая живой базальный слой. Это прямое следствие принятого допущения об очищенном уране (нарушенное вековое равновесие, отсутствие ^{226}Ra и его гамма-активных дочерних). Альфа-излучение $^{238}\text{U}/^{234}\text{U}/^{235}\text{U}$ в дозу кожи не входит: оно тормозится в стекле, а его пробег в ткани (~40 мкм) меньше толщины мёртвого слоя.

3 Модель и метод расчёта

Метод Монте-Карло и Geant4

Расчёт выполнен методом Монте-Карло — прямым статистическим моделированием судьбы каждой отдельной частицы: розыгрышем места рождения, энергии, направления и всех последующих взаимодействий с веществом вплоть до полного поглощения. Использована библиотека переноса частиц **Geant4** (GEometry ANd Tracking, разработка ЦЕРН, стандартный инструмент дозиметрии и медицинской физики), версия 11.2.1[9][10]. *Физический список* — набор моделей взаимодействий, подключаемых к транспорту; от него зависит точность:

- **G4EmStandardPhysics_option4** — наиболее точная стандартная конфигурация электромагнитной физики Geant4 (рекомендуется для дозиметрии). Для электронов включает ионизационные потери, тормозное излучение, многократное и однократное кулоновское рассеяние; для фотонов — фотоэффект, комптоновское и рэлеевское рассеяние, рождение пар, а также флюоресценцию и оже-эмиссию. Область применимости (от ~100 эВ) с запасом покрывает весь энергетический диапазон задачи[11].
- **G4RadioactiveDecay** — модуль радиоактивного распада. Для заданного ядра он разыгрывает акт распада по оценённым ядерным данным (библиотека на основе ENSDF / ICRP-107[4][5]): вид распада, *полный непрерывный β -спектр* (а не среднюю энергию), гамма-каскад дочернего ядра, электроны внутренней конверсии, характеристическое рентгеновское излучение и оже-электроны. Спектры источника не задаются вручную — они порождаются из ядерных данных.

Первичный источник и учёт цепочки распада

Первичной частицей каждой истории служит материнский ион (например, ^{234}Th) с нулевой кинетической энергией, помещённый в случайную точку объёма стекла; распад разыгрывается немедленно. Поскольку β -распад сохраняет массовое число A , изобарная подцепочка **$A = 234$** (^{234}Th

→ $^{234m}\text{Pa} \rightarrow ^{234}\text{U}$) в вековом равновесии моделируется как единое целое: один запуск с активностью ^{234}Th воспроизводит совокупное излучение ^{234}Th и ^{234m}Pa (их активности равны). Альфа-распад меняет A , поэтому дальше цепочка не идёт и радиевый ряд не восстанавливается. Цепочка $A = 235$ ($^{235}\text{U} \rightarrow ^{231}\text{Th}$) моделируется аналогично. Итоговая доза — сумма вкладов **двух непересекающихся цепочек**, что исключает двойной учёт (см. §11 — независимый аудит кода).

Свёртка активностями. Каждый расчёт даёт *отклик* — поглощённую энергию в ткани на один распад. Мощность дозы получается умножением отклика на измеренную активность и суммированием по цепочкам: $\dot{D} = \sum A_i \cdot R_i$. Разделение «транспорт ↔ активности» позволяет пересчитывать дозу при уточнении активностей без повторного моделирования.

Геометрия и фантом

Стекло — натрий-кальциевое силикатное (сода-известь) с добавкой U 1,84 масс.% и Se ~0,5 % (CeO_2 ; точное содержание неизвестно, влияние на перенос β/γ при этой доле пренебрежимо), плотность 2,5 г/см³[1]. **Бусина 6/0** (рокайль) моделируется как **сфера Ø4,1 мм с осевым цилиндрическим отверстием** (радиус 0,93 мм подобран под измеренную массу 63,96 мг); сфера касается кожи в одной точке. Источник распределён по объёму стекла, чем учитывается **самопоглощение бета-частиц**: часть эмитированных бета-частиц поглощается в самом стекле, не достигая кожи. По расчёту в стекле поглощается **55 % энергии бета-частиц** для одиночной бусины и до **67 %** в плотной укладке. **Цепочка** — 11 сфер в линейный ряд с шагом 4,1 мм (касание по внешнему диаметру), ось ряда параллельна поверхности кожи; скоринг под центральной бусиной. **Коврик** — квадратная решётка бусин с тем же шагом.

Фантом «кожа + прилегающие ткани». Для бета- и мягкого гамма-излучения от контактного источника адекватен не полноростовой воксельный фантом (бета-частицы уходят в ткань ≤ 1 см и не «видят» остального тела; воксельная модель не разрешает слой 70 мкм), а **слоистая тканевая пластина**: мягкая ткань ICRU[8] толщиной 2 см. Верхние 0,5 мм разрешены мелким шагом (15 мкм) и низким порогом рождения вторичных частиц (5 мкм). Поглощённая энергия набирается по слоям глубины и по радиусу в диске площадью 1 см²; отдельно учитываются **электроны** (β -частицы, электроны внутренней конверсии и Оже), **фотоны распада** (γ - и характеристическое рентгеновское излучение) и **тормозное излучение**.

Статистика

Статистика — $2 \cdot 10^6$ распадов на цепочку $A = 234$ и $1 \cdot 10^6$ на $A = 235$. Статистическая погрешность (1σ) мощности дозы в базальном слое — 0,3 % (одна бусина), 0,6 % (цепочка), 1,0 % (коврик), существенно меньше систематических допущений (§10). Вклад тормозного излучения в дозу кожи пренебрежимо мал ($< 0,1$ %). Обоснование достоверности расчёта — §8.

4 Мощность эквивалентной дозы в коже $\dot{H}_p(0,07)$: результаты

Мощность эквивалентной дозы внешнего облучения кожи $\dot{H}_p(0,07)$ (мкГр/ч = мкЗв/ч, взвешивающий коэффициент $w_R = 1$ для β и γ), контакт вплотную, усреднение по площади 1 см²:

Таблица 2. Мощность эквивалентной дозы по глубине кожи, мкЗв/ч. Электронная (β) и фотонная (γ) компоненты — раздельно. Статистическая погрешность ≲ 1 %.

Слой кожи	1 бус. β	1 бус. γ	1 бус. Σ	Коврик β	Коврик γ	Коврик Σ
поверхность 0–5 мкм	7,42	0,012	7,43	57,4	0,15	57,6
базальный (50–100 мкм)	6,68	0,007	6,69	48,3	0,10	48,4
дерма 0,3–0,5 мм	4,82	0,007	4,82	35,2	0,09	35,3
ткань 2–3 мм	0,96	0,003	0,97	7,43	0,05	7,49

Таблица 3. Мощность эквивалентной дозы $\dot{H}_p(0,07)$ в коже (базальный слой) по конфигурациям укладки. Первая погрешность — статистическая (1σ); «расчётный диапазон» учитывает систематику формы бусины и плотности стекла (§ ниже).

Конфигурация	$\dot{H}_p(0,07)$ (сфера), мкЗв/ч	стат. (1σ)	расчётный диапазон	доля электронов
одна бусина	6,69	±0,3 %	6,0–9,0	99,9 %
цепочка (11 бусин)	18,3	±0,6 %	16–23	99,9 %
коврик плотной вязки (9×9)	48,4	±1,0 %	44–53	99,8 %

Бюджет неопределённостей

Статистическая погрешность метода Монте-Карло мала (< 1 %); итоговую неопределённость расчёта определяют систематические допущения, прежде всего форма бусины. Сферическая модель даёт **нижнюю оценку** кожной дозы (компактная геометрия, точечный контакт, максимальное самопоглощение); цилиндрическая — верхнюю; истинное значение для реального рокайля (скруглённый бочонок) лежит между ними.

Таблица 4. Бюджет неопределённостей расчётной части (вклад в $\dot{H}_p(0,07)$).

Источник	Тип	Одна бусина	Коврик
статистика Монте-Карло	случайная	±0,3 %	±1,0 %
форма бусины (сфера ↔ цилиндр)	систематическая	+34 %	< 1 %
плотность стекла (2,0–3,4 г/см³)	систематическая	±10 %	±10 %
содержание церия	систематическая	< 1 %	< 1 %
суммарная (расчётная)		+35 % / –10 %	±10 %

Кроме перечисленного, результат **линейно пропорционален измеренной удельной активности** источника: её погрешность (входная измеренная величина) переносится в дозу множителем 1:1 и в расчётный бюджет не включена — при уточнении активностей дозу достаточно домножить на соответствующий коэффициент.

Насыщение поля с ростом укладки: мощность дозы в центре растёт лишь пока добавляются бусины в пределах поперечного разлёта бета-частиц (~1 см). Относительно одиночной бусины: цепочка $\times 2,7$; коврик $5 \times 5 \times 7,2$, $7 \times 7 \times 7,3$, $9 \times 9 \times 7,2$ — **дальнейшее расширение укладки мощность дозы не увеличивает** (насыщение достигается уже при размере $\sim 5 \times 5$). Мощность эквивалентной дозы в коже **практически целиком обусловлена электронной компонентой** ($> 99,8\%$); вклад фотонов не превышает 0,2 %, однако фотоны проникают в ткань существенно глубже бета-частиц (Рис. 1).

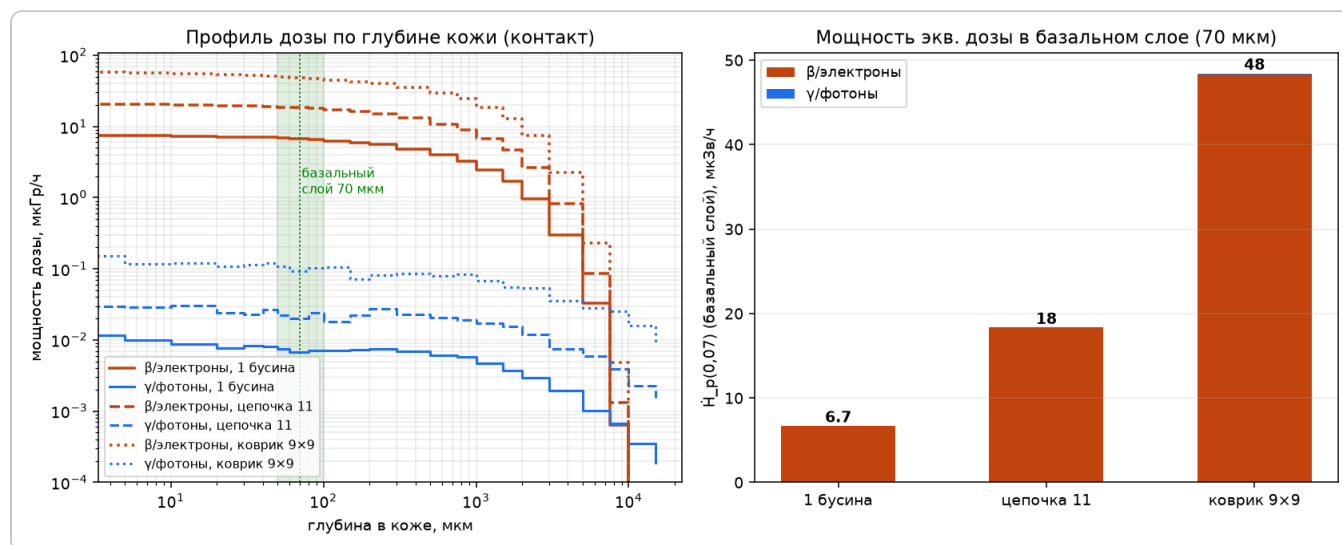


Рис. 1. Слева — распределение мощности поглощённой дозы по глубине фантома кожи для электронной (β -частицы, электроны конверсии и Оже) и фотонной (γ - и рентгеновское излучение) компонент; конфигурации «одна бусина», «цепочка» и «коврик». Зелёной полосой отмечен базальный слой эпидермиса (50–100 мкм), для которого нормируется мощность эквивалентной дозы в коже. Мощность дозы электронной компоненты убывает на глубинах, сопоставимых с экстраполированным пробегом β -частиц (≈ 11 мм для $E_{\max} = 2,27$ МэВ $^{234\text{m}}\text{Pa}$); ослабление фотонной компоненты происходит существенно медленнее (экспоненциально, с коэффициентом ослабления μ мягкой ткани). Справа — мощность эквивалентной дозы в базальном слое с разложением на компоненты.

Интерактивный калькулятор к статье. Приведённые выше три конфигурации — частные случаи. Для произвольных исходных данных доступен **калькулятор $\dot{H}_p(0,07)$ с трёхмерной визуализацией поля**.

Что задаётся: геометрия раскладки (одиночная бусина, цепочка, прямоугольная раскладка $N \times M$, круглая россыпь) и шаг укладки; диаметр бусины и плотность стекла; массовая доля урана; площадь усреднения (1, 0,1 или 0,01 см²); режим контакта — отсюда доза за сеанс, за год и доля от пределов для кожи.

Как считает. Это не интерполяция трёх опубликованных чисел. Построено точечное поверхностное ядро дозы, свёрнутое с профилем эмиссии по лицевой площадке бусины; мощность дозы суммируется по всем бусинам и усредняется по диску заданной площади.

Поэтому размер бусины и шаг укладки входят как параметры интегрирования: вклад бусины растёт как площадь её площадки (β -частицы выходят лишь из слоя $\sim 0,8$ мм, см. § 7.1), содержание урана — линейно.

Точность. Ядро откалибровано по семи опорным точкам настоящего расчёта — одиночная бусина при трёх площадях усреднения, цепочка 11, коврики 5×5 , 7×7 и 9×9 ; среднеквадратичное отклонение от Geant4 составляет **0,68 %**. Сравнительная таблица вычисляется страницей калькулятора на лету, тем же кодом, что и основной результат. За пределами области калибровки (диаметр вне 2...8 мм и т. п.) результат является экстраполяцией, о чём страница предупреждает явно; ограничение ответственности и границы применимости приведены там же.

5 Пространственное распределение поля мощности дозы

Трёхмерное распределение поглощённой дозы (в тканеэквивалентной среде) вокруг источника для трёх конфигураций. С ростом укладки локальное поле отдельной бусины переходит в квазиоднородный приповерхностный слой облучения; фотонная компонента во всех случаях распределена шире электронной и на порядки слабее.

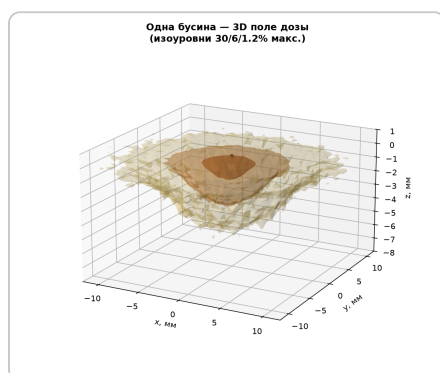


Рис. 2а. Одна бусина: локализованная область повышенной дозы, простирающаяся в кожу на несколько миллиметров.

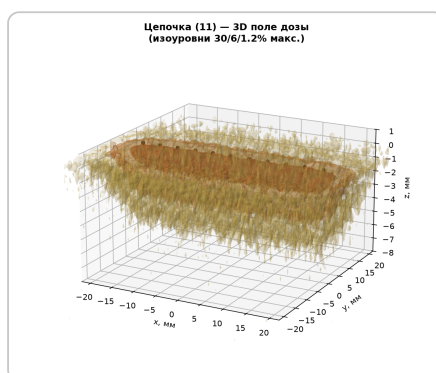


Рис. 2б. Цепочка: область облучения вытянута вдоль нити.

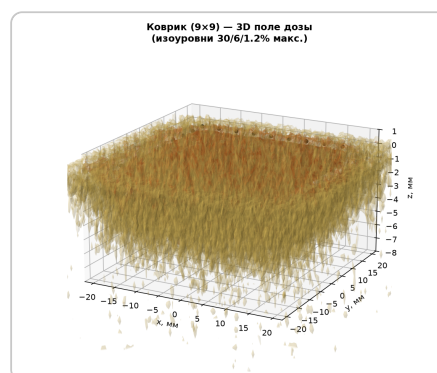


Рис. 2в. Коврик: приповерхностный слой ткани облучается квазиоднородно.

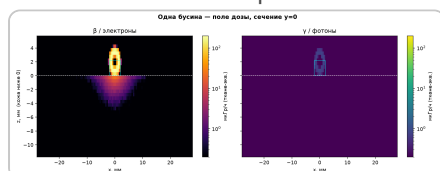


Рис. 3а. Вертикальное сечение поля дозы (электроны слева, фотоны справа), одна бусина. Голубым обозначено стекло.

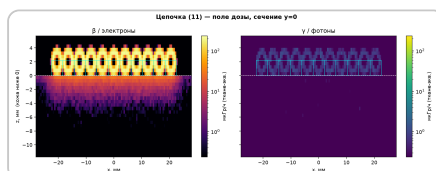


Рис. 3б. Цепочка.

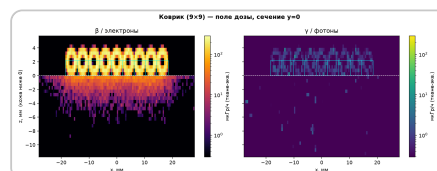


Рис. 3в. Коврик. Электронная компонента сосредоточена в приповерхностном слое ткани; фотонная распределена в существенно большем объёме при меньшей плотности дозы.

6 Локальная неоднородность: эффект «горячей частицы»

Сфера касается кожи практически в точке, поэтому естественен вопрос о возможном превышении нормы в микроскопическом пятне контакта. Однако норматив кожной дозы[6][7] определён именно как доза, **усреднённая по площади 1 см^2** — намеренно, поскольку он защищает от детерминированных эффектов кожи (эритема, некроз), возникающих лишь при облучении конечного объёма ткани; тот же подход к усреднению принят для дискретных радиоактивных частиц (NCRP-130, ICRP). Отдельного, более строгого «локального» предела для точечного контакта нормы не вводят.

Количественно: доза в базальном слое, усреднённая по диску всё меньшей площади под точкой контакта, растёт от нормативного значения $6,7 \text{ мкЗв/ч}$ (1 см^2) до 27 мкЗв/ч на площади $0,01 \text{ см}^2$ (Рис. 4). Отношение пика к среднему по 1 см^2 — **$\times 4,1$** . Даже это пиковое локальное значение (десятки мкЗв/ч) на порядки ниже уровней, при которых возникают детерминированные эффекты кожи: порог эритемы ($\sim 3 \text{ Гр}$) при 27 мкГр/ч был бы достигнут лишь за $\sim 10^5$ часов непрерывного контакта. Таким образом, локальная неоднородность поля не приводит к превышению норматива.

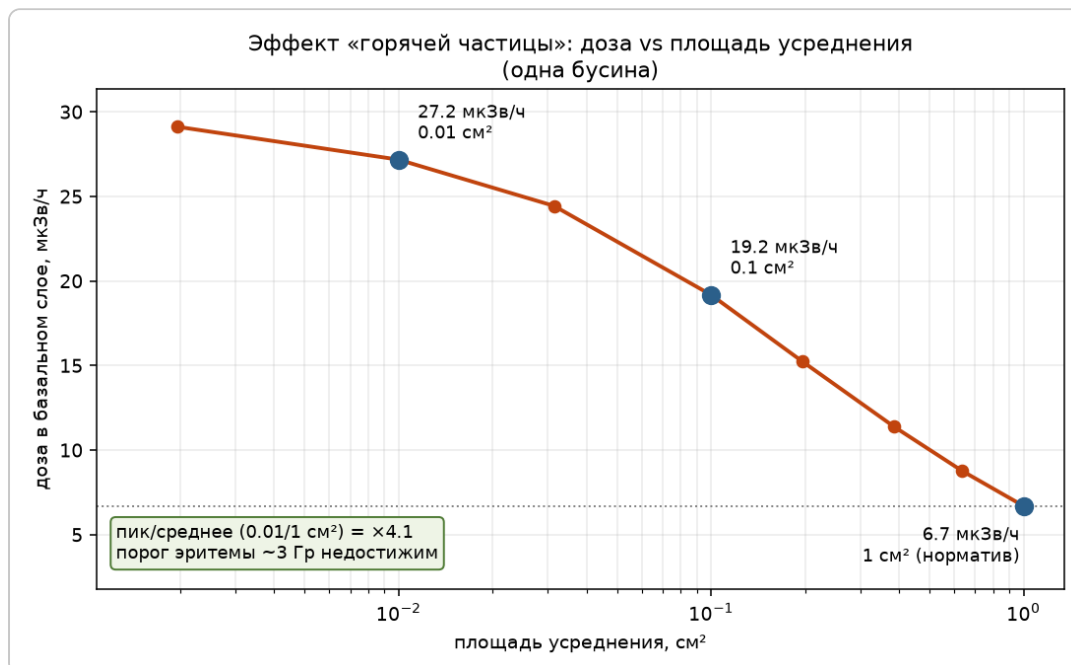


Рис. 4. Одна бусина: доза в базальном слое, усреднённая по диску, как функция площади усреднения. Отмечены площади $0,01$, $0,1$ и 1 см^2 (нормативная). Пик под точкой контакта превышает нормативное 1-см^2 -среднее в ~ 4 раза, оставаясь на порядки ниже порога детерминированных эффектов.

7 Проверочный расчёт классическим методом

Чтобы независимо от Geant4 проверить и порядок, и абсолютное значение дозы, выполнена классическая (полуаналитическая) оценка по принципу «от простого к точному»: сначала — замкнутая формула для коврика, которую читатель воспроизведёт вручную (§7.1), затем — объёмный интеграл по сфере с двумя вариантами дозового ядра (§7.2).

7.1. Мощность эквивалентной дозы $\dot{H}_p(0,07)$ плотной укладки: замкнутая формула (полубесконечный плоский источник)

Плотный коврик латерально много больше пробега бета-частиц (экстраполированный пробег β ^{234m}Pa $E_{\max} = 2,27$ МэВ в ткани $\approx 1,1$ г/см² ≈ 11 мм; коврик $9 \times 9 \approx 37$ мм), поэтому его правомерно приблизить **бесконечной однородной β -активной плоскостью стекла**. Мощность дозы у поверхности полубесконечного однородного источника равна *половине* равновесной мощности в бесконечной среде[17] (энергия делится поровну «вверх/вниз»), ослабленной до глубины базального слоя:

$$\dot{D}_p(0,07) = 1/2 \cdot \sum_i C_{v,i} \cdot \bar{E}_i \cdot e^{-v_i \sigma} \cdot k$$

- $C_{v,i}$ — удельная активность нуклида i , Бк/кг (Табл. 1);
- $\bar{E}_i$ — средняя энергия β -спектра, МэВ (IAEA/ICRP-107);
- $v_i = 16 \cdot (E_{\max,i} - 0,036)^{-1,4}$ — коэффициент ослабления β , см²/г (эмпирика Лёвинджера[16][17]);
- $\sigma = \rho_{\text{ткань}} \cdot d = 1,03$ г/см³ $\times 7,0 \cdot 10^{-3}$ см = **$7,21 \cdot 10^{-3}$ г/см²** — масс. глубина базального слоя (70 мкм);
- k — перевод (Бк/кг)·МэВ $\rightarrow$ мкГр/ч: $k = 1,602 \cdot 10^{-13}$ Дж/МэВ $\times 3,6 \cdot 10^9$ с·мкГр/(ч·Гр), т.е. $\dot{D}_{\infty}[\text{мкГр/ч}] = C_v \cdot \bar{E} \cdot \mathbf{5,767 \cdot 10^{-4}}$.

Пример для доминирующего ^{234m}Pa (проверяется калькулятором в четыре строки):

1. $v = 16 \cdot (2,27 - 0,036)^{-1,4} = 16 \cdot (2,234)^{-1,4} = 16 / 3,08 = \mathbf{5,19 \text{ см}^2/\text{г}}$;
2. $v\sigma = 5,19 \times 7,21 \cdot 10^{-3} = 0,0374$; $e^{-0,0374} = 0,963$;
3. $\dot{D}_{\infty} = 2,27 \cdot 10^5 \times 0,819 \times 5,767 \cdot 10^{-4} = \mathbf{107,2 \text{ мкГр/ч}}$;
4. вклад = $1/2 \times 107,2 \times 0,963 = \mathbf{51,7 \text{ мкГр/ч}}$.

Таблица 5. Аналитическая оценка коврика по всем трём β -нуклидам (модель полубесконечного источника).

Нуклид	C_v , Бк/кг	$\bar{E}$, МэВ	$E_{\max}$, МэВ	v , см ² /г	$v\sigma$	$e^{-v\sigma}$	$\dot{D}_{\infty}$, мкГр/ч	$1/2 \cdot \dot{D}_{\infty} \cdot e^{-v\sigma}$
^{234m}Pa	$2,27 \cdot 10^5$	0,819	2,27	5,19	0,037	0,963	107,2	51,7
^{234}Th	$2,27 \cdot 10^5$	0,060	0,199	202,8	1,462	0,232	7,86	0,91
^{231}Th	$9,90 \cdot 10^3$	0,163	0,389	68,7	0,496	0,609	0,93	0,28
Сумма (ручная оценка коврика)								52,8

Неопределённость. Результат доминируется ^{234m}Pa (множитель $e^{-v\sigma} \approx 0,96$ почти не влияет). Определяющие вклады — удельная активность (HPGe, $u \approx 10$ %) и средняя энергия β -спектра ($u \approx 10$ %): $u_{\text{отн}} = \sqrt{(0,10^2 + 0,10^2)} \approx 14$ %. Итог: **$\dot{D}_p(0,07) \approx 53 \pm 7$ мкГр/ч**.

Аналитическая оценка 53 ± 7 мкГр/ч против Монте-Карло $48,4$ мкГр/ч — согласие $+9$ % (в пределах неопределённости). Замкнутая формула, считаемая на бумаге, воспроизводит МК-результат для коврика. Небольшое завышение ожидаемо: реальный слой бусин имеет конечную толщину ($\sim 0,4$ г/см², сопоставимо с пробегом), тогда как «полубесконечная» модель предполагает бесконечно толстый источник и слегка переоценивает вклад дальних слоёв.

7.2. Мощность эквивалентной дозы $\dot{H}_p(0,07)$ одиночной бусины: интеграл дозового ядра по сфере

Одиночная бусина мала в сравнении с пробегом β , поэтому полубесконечное приближение к ней неприменимо. Для неё (и промежуточных укладок) взято бета-точечное дозовое ядро, проинтегрированное по объёму стекла сферы с учётом самопоглощения; цепочка и коврик получены суперпозицией сфер на решётке:

$$\dot{D}(r) = a \cdot \bar{E} \cdot v / (4\pi I) \cdot \Phi(v \cdot m) / r^2, \quad I = \int_0^\infty \Phi(u) du$$

где m — масса вдоль луча (стекло + ткань), r — расстояние; $a \cdot \bar{E}$ — полная излучаемая мощность, $1/(4\pi r^2)$ — геометрическое расхождение изотропного точечного источника, $\Phi(v \cdot m)$ — безразмерная радиальная функция спада дозы (дозовое ядро)[16][18], а нормировочный множитель $v/(4\pi I)$ с $I = \int_0^\infty \Phi(u) du$ фиксируется условием сохранения энергии ($\int \dot{D} \cdot \rho \cdot 4\pi r^2 dr = a \cdot \bar{E}$). Доза считается только в точках-мишенях на коже (диск 1 см² на глубине базального слоя) и суммируется по всем точкам-источникам в стекле: множитель $1/(4\pi r^2)$ задаёт долю изотропной эмиссии каждой точки, попадающую на кожу **в пределах её телесного угла**, а $\Phi(v \cdot m)$ ослабляет её на длине стекла **именно по лучу к коже**. То есть учитывается не «вся эмиссия из сферы», а лишь достигающая кожи (электроны, ушедшие вверх/вбок, мишени на коже не имеют). Рассмотрены два ядра Φ :

- **экспоненциальное** $\Phi(x) = e^{-x}$ ($I = 1$) — простейшее, с бесконечным «хвостом»;
- **ядро Лёвинджера (1956)**[16] $\Phi(x) = c(1 - (x/c) \cdot e^{1-x/c}) + x \cdot e^{1-x}$ при $x \leq c$; $x \cdot e^{1-x}$ при $x > c$ ($c = 2$, $I = 3,845$) — физичнее: спадает круче и обрывается у пробега.

Таблица 6. Классическая оценка (интеграл по сфере) против Монте-Карло, мкЗв/ч. В скобках — отношение к МК.

Конфигурация	Монте-Карло	эксп. ядро	ядро Лёвинджера
одна бусина	6,69	6,39 (×0,96)	5,83 (×0,87)
цепочка (11)	18,3	21,9 (×1,19)	19,9 (×1,09)
коврик (9×9)	48,4	74,6 (×1,54)	68,5 (×1,41)

Для одиночной бусины экспоненциальное ядро совпадает с Монте-Карло на 4 % (6,39 против 6,69 мкЗв/ч) — базовый источник воспроизведён полностью независимым методом. Систематические отклонения на укладках разобраны в §8.

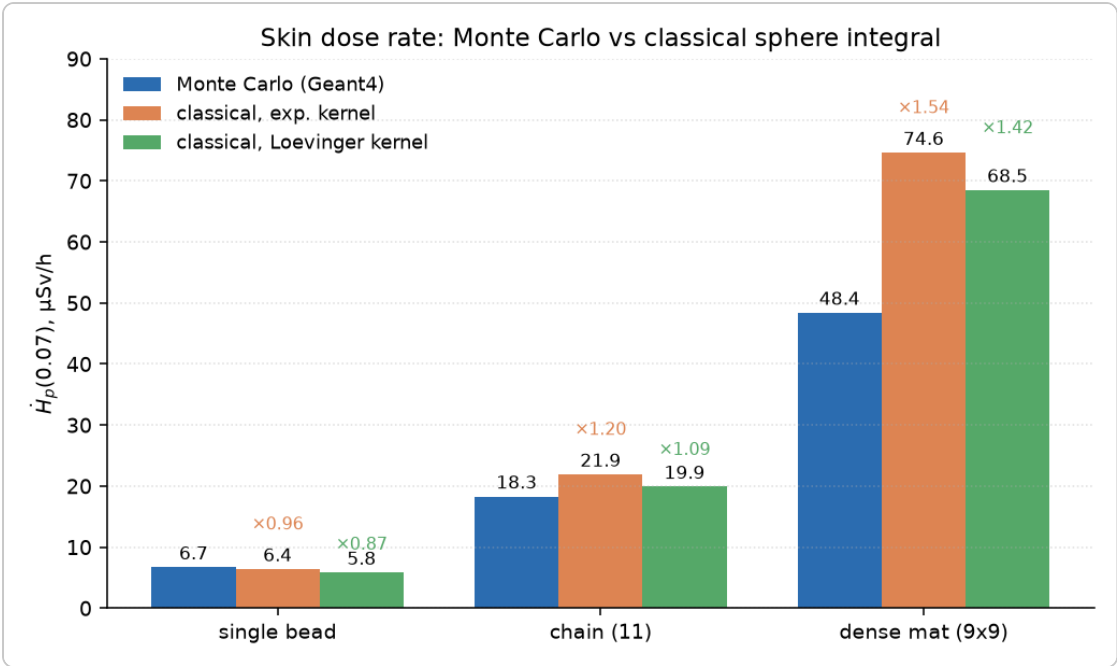


Рис. 5. Классическая (полуаналитическая) оценка по сферической модели против Монте-Карло. Для одиночной бусины методы совпадают в пределах 4 %; на протяжённых укладках экспоненциальное ядро систематически завышает дозу, а ядро Лёвинджера (обрывается у пробега) заметно ближе к МК.

8 Анализ достоверности и расхождений

Результату можно доверять, поскольку он подтверждается несколькими **независимыми** линиями; ниже — их сводка, затем разбор единственного систематического расхождения.

Таблица 7. Независимые проверки расчёта: метод, его источник и результат сверки с Монте-Карло.

Что проверяем (метод и источник)	Результат сверки
Проверка нормировки (санити-тест): расчётный флюенс точечного изотропного γ-источника в вакууме сверяется с точным законом обратных квадратов $\Phi = N/(4\pi r^2)$ на 10/20/30 см	отношение расчёт/аналитика = 1,000 — геометрия, розыгрыш первичных частиц и нормировка скоринга воспроизводят точное решение
Самосогласованность входных данных из первых принципов: измеренная удельная активность ↔ массовая доля урана (через удельную активность чистого ^{238}U , λN)	$2,27 \cdot 10^5$ Бк/кг → 1,83 масс.% U , совпадает с независимо измеренными 1,84 %; ^{235}U 0,67 %
Независимая аналитическая формула для плотной укладки (§7.1; полубесконечный источник, Лёвинджер/Cember[16][17])	53 ± 7 мкГр/ч против МК 48,4 → +9 %
Независимый интеграл дозового ядра по сфере для одиночной бусины (§7.2; ядро Лёвинджера[16][18])	6,39 против МК 6,69 мкЗв/ч → 4 %

Независимый аудит кода отдельным ИИ-агентом
(\$11): пересчёт доз из сырых прогонов + трек-дамп
цепочек распада Geant4

дозы воспроизведены; выявлена и
устранена ошибка нормировки первой
редакции

8.1. Расхождение «классика ↔ Монте-Карло» на укладках

Единственное систематическое расхождение — рост отношения «интеграл по сфере / МК» с размером укладки: экспоненциальное ядро $\times 0,96 \rightarrow \times 1,19 \rightarrow \times 1,54$, ядро Лёвинджера $\times 0,87 \rightarrow \times 1,09 \rightarrow \times 1,41$. Это не случайный разброс, а эффект с ясной физической причиной:

- **«Толстый хвост» ядра — главная причина.** Экспоненциальное ядро $e^{-v \cdot m}/r^2$ присваивает ненулевую дозу сколь угодно далёким точкам, тогда как истинное β -ядро **резко обрывается на экстраполированном пробеге**. Для одиночной бусины дозу формирует ближняя зона (обе модели совпадают); при добавлении далёких бусин хвост переоценивает их вклад — тем сильнее, чем больше укладка. Монотонный рост завышения $4\% \rightarrow 19\% \rightarrow 54\%$ — прямая «подпись» эффекта. **Ядро Лёвинджера, спадающее круче и обрывающееся у пробега, систематически ближе к МК** ($54\% \rightarrow 41\%$, $19\% \rightarrow 9\%$), что подтверждает диагноз.
- **Весь спектр описан одной энергией и одним коэффициентом ослабления.** Классическая модель заменяет непрерывный β -спектр (много энергий) единственной средней энергией $\bar{E}$ и единственным коэффициентом ослабления v , вычисленным по граничной энергии $E_{\max}$. В реальности мягкие β -частицы поглощаются у поверхности, а жёсткие проникают глубже, поэтому «жёсткость» пучка растёт с глубиной и эффективное ослабление меняется от точки к точке. Одно усреднённое v этого не передаёт: оно занижает спад дозы с расстоянием и потому завышает дальнее поле (вклад далёких бусин).
- **Прямолинейное изотропное ядро без рассеяния.** Не учтены многократное и обратное рассеяние электронов, которые в МК слегка снижают дальнее поле; вклад второго порядка.

Вывод. Совпадение на уровне базового источника (ручной расчёт $+9\%$, сфера 4%) подтверждает корректность физики и нормировки. Систематическое завышение классики на укладках предсказуемо и объясняется известным ограничением дозового ядра при суперпозиции протяжённых источников; более физичное ядро Лёвинджера это подтверждает, приближаясь к МК. В этой области **Монте-Карло достовернее** — истинный конечный пробег β , полный спектр и рассеяние учтены явно, а не приближённо. Дополнительно результат опирается на валидированную физику (G4EmStandardPhysics_option4, спектры ENSDF/ICRP-107), статистическую сходимость ($1\sigma < 1\%$) и консервативные допущения (контакт вплотную, сфера как нижняя оценка), а полная открытость проекта (beads_skin) позволяет перепроверить каждый шаг. Тем не менее приведённые величины остаются **модельной оценкой**: методические ошибки и погрешности исходных данных не исключены, поэтому перед практическим применением необходима **независимая проверка квалифицированными специалистами** и, при необходимости, прямое измерение аттестованными приборами (см. уведомление в начале).

9 Сравнение с нормативами

Соответствующий норматив — предел эквивалентной дозы **в коже** по НРБ-99/2009[7]; он определён именно как доза, усреднённая по площади 1 см² на глубине базального слоя, — то есть та величина $\dot{H}_p(0,07)$, что рассчитана здесь. Общий предел эффективной дозы (1 мЗв/год для населения) к локальному облучению кожи напрямую не применяется.

Таблица 8. Пределы эквивалентной дозы в коже (НРБ-99/2009[7]) и время контакта до предела для населения (50 мЗв/год).

Сценарий	$\dot{H}_p(0,07)$, мкЗв/ч	Часов до 50 мЗв/год	Эквивалент
одна бусина	6,7	≈ 7500	~20 ч каждый день весь год
цепочка (11)	18,3	≈ 2700	~7,5 ч каждый день весь год
коврик плотной вязки	48,4	≈ 1030	~2,8 ч каждый день весь год

Пределы эквивалентной дозы в коже: **население 50 мЗв/год, персонал группы А 500 мЗв/год**. Реалистичные режимы обращения:

Таблица 9. Доза в коже при типичных режимах и доля от предела для населения (50 мЗв/год).

Режим	Доза в коже за год	Доля от 50 мЗв
украшение (плотный коврик у кожи) 2 ч/сут	≈ 35 мЗв	71 % — ниже предела
украшение (коврик) 1 ч/сут	≈ 18 мЗв	35 %
ношение цепочки 24 ч/сут	≈ 160 мЗв	320 % — выше населения, ниже персонала А
ношение коврика 24 ч/сут	≈ 424 мЗв	848 % — выше населения, ниже персонала А (500)
одиночная бусина, эпизодический контакт	≪ 1 мЗв	ничтожно
пересыпание/сортировка (минуты)	≪ 0,01 мЗв	ничтожно

Вывод. Мощности на контакте (6,7–48 мкЗв/ч) сами по себе не малы, однако предел эквивалентной дозы в коже высок (50 мЗв/год для населения), поэтому заметная доза

набирается лишь при **длительном непрерывном контакте вплотную** — многие часы в день круглый год. Обычное обращение (эпизодический контакт, ношение изделия несколько часов в день) укладывается в норматив для населения. Даже круглосуточное ношение плотной укладки прямо на коже (≈ 424 мЗв/год) превышает предел для населения, но остаётся ниже предела для персонала группы А (500 мЗв/год).

10 Допущения и границы применимости

- **Нарушение равновесия.** Принято, что радий и последующие члены ряда отсутствуют (очищенный уран). Остаточный ^{226}Ra (частичное равновесие) добавил бы проникающее гамма-излучение ряда — это отдельный источник, здесь не учтён. Для радийсодержащего стекла картина изменилась бы качественно.
- **Плотность стекла** $2,5 \text{ г/см}^3$ — допущение; на самопоглощение бета-частиц влияет слабо, поскольку при фиксированных измеренной массе и внешнем диаметре поверхностная плотность стекла от плотности почти не зависит.
- **Форма бусины.** Рокайль 6/0 моделирован сферой $\varnothing 4,1$ мм с осевым отверстием при измеренной массе; реальная форма (скруглённый бочонок) промежуточна между сферой и цилиндром, поэтому истинная доза лежит между сферической оценкой (данная работа) и цилиндрической (на ~ 20 % выше для одиночной бусины; для плотной укладки различие мало).
- **Содержание церия** $\sim 0,5$ % (точно неизвестно); на перенос β/γ при этой доле не влияет.
- **Контакт вплотную** — консервативный (максимальный) случай кожной дозы. Любой зазор (ткань одежды, оправка, слой пыли, лак) резко снижает электронную компоненту ($> 99,8$ % дозы): пробег бета-частиц в плотном материале — доли миллиметра.
- **Предел для кистей/стоп** также 50 мЗв/год (население) — тот же порядок, актуален при длительном удержании бисера в руках.

11 Заявление об использовании ИИ

Работа выполнена в связке «оператор + ИИ-агент» (интерфейс Claude Code, Anthropic). Роли распределены так:

- **Расчётная линия** (модель источника, геометрия и физика в Geant4, код на C++, прогоны, постпроцессинг и свёртка на Python, иллюстрации и 3D-визуализация поля, текст статьи) — ИИ-агент Claude Code; модели Anthropic Claude Opus 4.8 и Claude Fable 5.
- **Независимый аудит** — отдельный ИИ-агент (модель Anthropic Claude): проверка по фактам и методике. Аудит независимо воспроизвёл дозы из сырых данных расчёта и выявил ошибку нормировки в первой редакции (двойной учёт изобарной подцепочки при суммировании перекрывающихся прогонов): команда ограничения цепочки в аналоговом режиме Geant4 не действует, поэтому запуск ^{234}Th уже содержал вклад $^{234\text{m}}\text{Pa}$. Исправление — суммирование только по двум непересекающимся цепочкам ($A = 234$, $A = 235$). Качественные выводы при этом не изменились (ошибка была в консервативную сторону).
- **Оператор (человек):** предоставление образца и его характеристик, измеренных коллегами методом гамма-спектрометрии на HPGe-детекторе[14] (удельные активности $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$, масса, геометрия), постановка задачи, выбор и подтверждение допущений, приёмка каждого шага,

критические замечания, решения о публикации. Ответственность за исходные допущения и итоговые выводы — на операторе.

Все приведённые величины воспроизводимы приложенным кодом (проект `beads_skin`). К статье прилагается интерактивный калькулятор $\dot{H}_p(0,07)$ для произвольной геометрии раскладки, содержания урана и размера бусин (описание — в § 4); его расчётное ядро откалибровано по опорным точкам настоящей работы и целиком выполняется в браузере читателя.

12 Источники, данные и код

1. Strahan D. Uranium in glass, glazes and enamels: history, identification and handling. *Studies in Conservation*, 46(3), 2001, 181–195. Взято: типичное содержание урана в стекле — до ~1.4–2 масс.% (наш образец 1.85 %), обращение и доза. tandfonline (<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/sic.2001.46.3.181>)
2. Bamford C.R. *Colour Generation and Control in Glass*. Elsevier, 1977. Взято: CeO_2 как обесцвечиватель стекла.
3. Механизм обесцвечивания церием (окисление $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$) и типичные доли CeO_2 0.025–0.2 масс.%; обзор «Use of cerium oxide as decolorant in the glass industry»; Stanford Advanced Materials. ResearchGate (https://www.researchgate.net/publication/294227162_Use_of_cerium_oxide_as_decolorant_in_the_glass_industry)
4. **IAEA Nuclear Data Services, Live Chart of Nuclides** (оценка ENSDF). Данные распада ($T_{1/2}$, β -эндпоинты, γ -линии) для ^{234}Th , $^{234\text{m}}\text{Pa}$, ^{235}U , ^{231}Th , ^{230}Th получены напрямую через API (relnsd/v1). Взято: $^{234\text{m}}\text{Pa}$ $Q_\beta \approx 2.27$ МэВ; ^{235}U γ 143.8/163.4/185.7/205.3 кэВ (185.7 = 57.2 %); ^{234}Th γ 63.3 кэВ; ^{231}Th Q_β 391.5 кэВ; ^{230}Th $T_{1/2}$ 75 584 года. nds.iaea.org — Live Chart (<https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>)
5. ICRP Publication 107. *Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations*. Ann. ICRP 38(3), 2008. Библиотека распада, использованная в Geant4 RadioactiveDecay. icrp.org (<https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20107>)
6. Evaluated Nuclear Structure Data File (ENSDF), NNDC, Brookhaven National Laboratory. nndc.bnl.gov/ensdf (<https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>)
7. ICRP Publication 103. *The 2007 Recommendations of the ICRP*. Ann. ICRP 37(2–4), 2007. Взято: доза в коже — среднее по 1 cm^2 на глубине 70 мкм (7 mg/cm^2). icrp.org (<https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>)
8. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009 (СанПиН 2.6.1.2523-09). Пределы: кожа население 50 мЗв/год, персонал А 500 мЗв/год. PDF (<https://www.ntcexpert.ru/documents/docs/nrb-99-2009.pdf>)
9. ICRU Report 44. *Tissue Substitutes in Radiation Dosimetry and Measurement*. 1989. Взято: состав мягкой ткани (реализован через материал G4_TISSUE_SOFT_ICRP). icru.org (<https://www.icru.org/report/tissue-substitutes-in-radiation-dosimetry-and-measurement-report-44/>)

10. Agostinelli S. et al. Geant4 — a simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Meth. A* 506(3), 2003, 250–303. doi:10.1016/S0168-9002(03)01368-8 ([https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8))
11. Allison J. et al. Recent developments in Geant4. *Nucl. Instrum. Meth. A* 835, 2016, 186–225. doi:10.1016/j.nima.2016.06.125 (<https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125>)
12. Geant4 Physics Reference Manual (v11.2): G4EmStandardPhysics_option4, G4RadioactiveDecay. geant4.web.cern.ch (<https://geant4.web.cern.ch/>)
13. Bourdon B. et al. (eds). *Uranium-series Geochemistry*. Reviews in Mineralogy and Geochemistry 52, 2003. Взято: нарушение векового равновесия при химическом фракционировании урана. doi:10.1515/9781501509308 (<https://doi.org/10.1515/9781501509308>)
14. Hamby D.M. et al. VARSKIN — a computer code for skin contamination dosimetry. NUREG/CR-6918. Методологический аналог; сравнение в данной работе не проводилось. nrc.gov (<https://www.nrc.gov/v/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6918/>)
15. Данные образца — удельные активности $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$, масса и геометрия («Чашка Петри») измерены коллегами методом гамма-спектрометрии высокого разрешения на полупроводниковом HPGe-детекторе (особо чистый германий); данные предоставлены оператору (внутренние, 2021).
16. Hassan H.J., Hashim S. et al. Naturally Occurring Radioactive Materials in Bracelets and Necklaces: Radiological Risk Evaluation. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 18(21), 2021, 11170. Аналогичная работа (HPGe + Geant4 MC по украшениям с NORM): их источник радийсодержащий (ряды U/Th целы, Th-доминантный), оценивалась гамма-доза → эквивалентная доза в коже 0,04–0,42 мкЗв/ч (Табл. 3 источника, макс. образец N16); наш очищенный U бета-доминантный → выше по коже, но без проникающей γ ряда. doi:10.3390/ijerph182111170 (<https://doi.org/10.3390/ijerph182111170>)
17. Loevinger R. The dosimetry of beta sources in tissue. The point-source function. *Radiology* 66(1), 1956, 55–62. Взято (§7.2): бета-точечная дозовая функция $\Phi(x)$, в т.ч. форма Лёвинджера, и эмпирический коэффициент ослабления β . doi:10.1148/66.1.55 (<https://doi.org/10.1148/66.1.55>)
18. Cember H., Johnson T.E. *Introduction to Health Physics*, 4-е изд. McGraw-Hill, 2009, гл. «Beta dosimetry». Взято (§7.1): рабочие формулы β -дозиметрии — кажущийся коэффициент ослабления $v = 16(E_{\max} - 0,036)^{-1,4}$ см²/г; равновесная поглощённая доза в бесконечной среде $\dot{D}_{\infty} = C_v \cdot \bar{E}$ и её половина у поверхности полубесконечного источника.
19. Cross W.G., Freedman N.O., Wong P.Y. Beta-ray dose distributions from point sources in an infinite water medium. *Health Physics* 63(2), 1992, 160–171. Взято (§7.2): метод бета-точечного дозового ядра — геометрическое расхождение $1/(4\pi r^2)$ с радиальной функцией спада; эталонные распределения дозы вокруг точечного источника в воде. PubMed 1399614 (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1399614/>)

Код и данные расчёта: проект Geant4 `beads_skin` (main.cc, свёртка `postproc_beads.py`, рендеры `field_render.py`, `fig_hotparticle.py`). Все графические материалы — в каталоге `figures/` этой страницы.

Приложение А. Пересчёт плотности потока β в мощность эквивалентной дозы $\dot{H}_p(0,07)$ (плотная укладка)

Для полевого контроля удобно связать показание **плотности потока β -частиц** ϕ_β (измеряется приборами контроля плотности потока β -частиц, например блоком детектирования **БДПБ** или дозиметром-радиометром **МКС-01СА**) с мощностью эквивалентной дозы в коже. Для геометрии «плотная укладка»:

$$\dot{H}_p(0,07) = K \cdot \phi_\beta$$

Плотность потока — прямой расчёт Монте-Карло. В той же модели Geant4 (§3) для коврика 9×9 подсчитаны β -частицы, пересекающие границу кожи (диск 1 см²), со свёрткой по измеренным активностям (как для дозы). Учтён порог регистрации **156 кэВ** (мягкие β отсекаются прибором):

Таблица А1. Плотность потока β с поверхности плотной укладки (прямой транспорт Geant4).

Величина	$\beta \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$\beta \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$
все β	17,9	1070
$\beta > 156 \text{ кэВ}$ (порог БДПБ)	16,4	983

Сверка с измерением. Оператор измерил образец (бисер в чашке Петри) прибором контроля плотности потока β : $\approx 1200 \beta \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$. Прямой расчёт даёт $\approx 1000\text{--}1070 \beta \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$ — согласие $\sim 15\%$ (образец в чашке несколько плотнее модельного однорядного коврика), что **независимо подтверждает транспортную модель**.

Коэффициент. При $\dot{H}_p(0,07)$ плотной укладки = 48,4 мкЗв/ч (Монте-Карло, §4) и $\phi_\beta(>156 \text{ кэВ}) = 16,4 \beta \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$:

$$K \approx 3,0 \text{ (мкЗв/ч)} / (\beta \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}) \text{ или } K \approx 0,05 \text{ (мкЗв/ч)} / (\beta \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1})$$

Ориентир: $1000 \beta \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1} \approx 50 \text{ мкЗв/ч}$. Неопределённость $\sim 30\%$ (плотность стекла $\pm 10\%$, статистика МК, геометрия измерения и обратное рассеяние). *Примечание.* Простая аналитическая оценка «чистого тока» $J = C_m \cdot n_\beta / (6v) = 7,5 \beta \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ даёт вдвое меньше: детектор считает все *пересечения* ($\approx 2 \times$ тока при широком угловом распределении) плюс конверсионные электроны — поэтому используется прямой транспорт, согласованный с измерением.

Как пользоваться. Измерить блоком БДПБ (или МКС-01СА) плотность потока β на поверхности изделия плотной укладки (вышивка, плотное низание) и умножить на К. Замечания: **(1)** коэффициент выведен для *плотной укладки* (квазибесконечная плоскость); для одиночной бусины или редкой раскладки локальная связь «поток $\leftrightarrow$ доза» иная. **(2)** Прибор регистрирует 2л-эмиссию с поверхности — использовать штатную калибровку прибора по плотности потока. **(3)** Оба прибора измеряют плотность

потока β в одних единицах — **мин⁻¹·см⁻²**: БДПБ-01 (АТОМТЕХ) регистрирует β 0,156–3,54 МэВ, калибруется по $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$; МКС-01СА (СНИИП АУНИС) — диапазон 5–3·10⁴ мин⁻¹·см⁻². $E_{\text{max}}^{234\text{mPa}}$ (2,27 МэВ) лежит в рабочем диапазоне обоих, а спектр близок к ^{90}Y (2,28 МэВ) → энергетический отклик практически совпадает, штатная калибровка применима напрямую. **(4)** Геометрия — контакт вплотную (консервативная оценка). Расчёт: скрипт `handcalc_flux.py` проекта `beads_skin`.

Расчёт выполнен ИИ-агентом (Anthropic Claude) под руководством и контролем оператора. Метод — прямое Монте-Карло моделирование переноса излучения (Geant4 11.2.1) со свёрткой измеренными активностями. Величины даны для консервативной геометрии контакта вплотную.

VibeEngineering · 23.07.2026 · дозиметрия уранового бисера · ред. 5 (структура проблема→решение→проверка→анализ; величина $\dot{H}_p(0,07)$; ручной классический расчёт; оформление по ГОСТ 8.417 — десятичная запятая, УДК)