

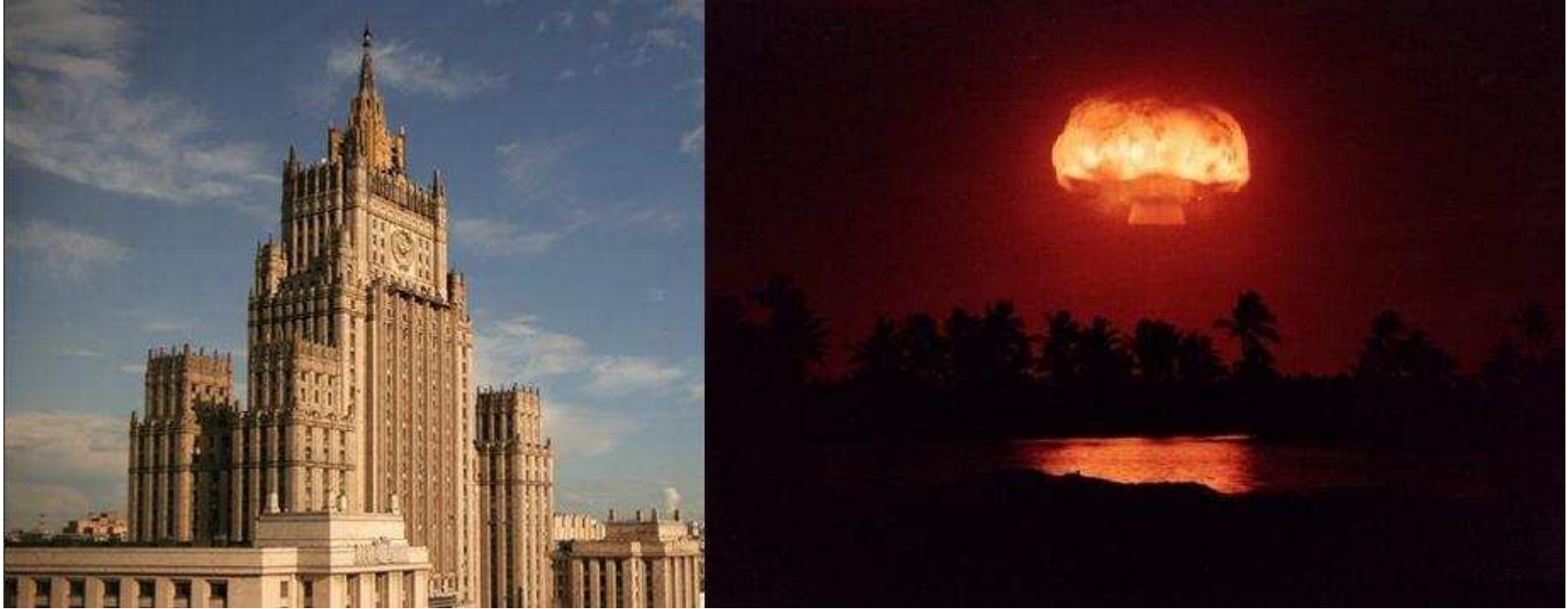
**Пенталогия докладов**  
**«Действие ядерного взрыва на металлические**  
**конструкции и электронные схемы РЭО»**

Научный сотрудник кафедры теоретической физики физического факультета  
ОмГУ

Попов Иван Сергеевич



**Ядерный взрыв** – явление, начинающееся с момента создания условий для осуществления цепных реакций деления или реакций синтеза взрывного типа в небольшом объёме на время порядка от нескольких наносекунд до нескольких миллисекунд и заканчивающееся распадом распределённых по атмосфере и поверхности земного шара радиоактивных продуктов взрыва в течение многих лет.



В связи с подписанием и ратификацией РФ договора 1996 г о всеобъемлющем запрещении проведения испытаний ядерного оружия, особую актуальность приобретает моделирование воздействия ядерных взрывных устройств.

В связи с высокой стоимостью физического моделирования данных воздействий, актуальность приобретают методы математического и компьютерного моделирования воздействия взрыва, точность и адекватность которых в последние годы гораздо превосходит методы физического моделирования.

## **Серия докладов:**

- 1) Взаимодействие ионизирующих излучений с преградой.
- 2) Вторичные электромагнитные эффекты ядерного взрыва.
- 3) Взаимодействие полей ЭМИ ядерного взрыва с объектами.
- 4) Действие ионизирующих излучений и ЭМИ ядерного взрыва на проволочные антенны.
- 5) Действие излучений на электронные системы.

## **Аннотация пенталогии докладов:**

Будут рассмотрены и охарактеризованы современные методы моделирования взаимодействия ионизирующих излучений с преградой сложной геометрии; также будут рассмотрены результаты проведённых исследований действия ядерного взрыва на РЭО.



## **Классификация ядерных взрывных устройств по принципу энерговыделения поражающих факторов:**

- Атомные.
- Обыкновенные термоядерные.
- Многоступенчатые.
  - Трёхступенчатые на реакции Джекилла-Хайда.
  - Ядерные взрывные устройства с большим числом ступеней.
- Специальные.
  - Нейтронные.
  - Чистые.
  - Радиологические.

## **Классификация ядерных взрывных устройств по величине энергвыделения:**

- Сверхслабые (менее 1 кт).
- Слабые (от 1 кт до 10 кт).
- Средние (от 10 кт до 100 кт).
- Мощные (от 100 кт до 1 Мт).
- Сверхмощные (более 1 Мт).

## **Ядерный взрыв:**

- Ядерный взрыв вблизи поверхности земли.
- Глубокий подземный (камуфлетный) ядерный взрыв.
- Высотный ядерный взрыв.
- Ядерный взрыв на акватории.



## **Ядерный взрыв вблизи поверхности земли и ядерный взрыв на акватории:**

- Взрыв на большой высоте.
- Наземный ядерный взрыв.
- Контактный ядерный взрыв.
  - С несущественным забором вещества поверхности.
  - С существенным забором вещества поверхности.
- Взрыв на малой глубине.
- Взрыв на большой глубине.

## **Поражающие факторы ядерного взрыва вблизи поверхности земли:**

- Мгновенные проникающие излучения.
- Электромагнитный импульс.
- Световое излучение.
- Воздушная ударная волна.
- Сейсмовзрывные волны.
- Радиационное поражение местности.

## **Поражающие факторы ядерного взрыва на акватории:**

- Мгновенные проникающие излучения.
- Световое излучение.
- Воздушная ударная волна.
- Ударная волна в воде.
- Сейсмозрывные волны.
- Поверхностные явления.
  - Явления, сопутствующие султану выброса.
  - Гравитационные волны.
- Радиационное заражение местности.
  - Облако взрыва.
  - Базисная волна.
  - Перенос радиоактивных веществ течениями.

## **Высотный ядерный взрыв:**

- Взрыв на высоте до 40 км.
- Взрыв на высоте 40-80 км.
- Взрыв на высоте 80-120 км.
- Взрыв в верхней атмосфере.
- Магнитосферный ядерный взрыв.
- Ядерный взрыв в открытом космосе.

## **Поражающие факторы высотного ядерного взрыва:**

- Мгновенные проникающие излучения.
- Световое излучение.
- Ударные волны.
- Ионизированные области и плазменные образования и течения.
- Электромагнитный импульс.
  - Мгновенный высокочастотный импульс.
  - Высокочастотный импульс.
  - Магнитогидродинамический импульс.



Испытание: REDWING - Erie  
Время: 06:15. 31 мая 1956 (мест. время)  
Место: о. Runit, атолл Эниветок  
Тип взрыва: 100-м. вышка  
Мощность: 14.9 кт.



Испытание: DOMINIC - Arkansas

Время: 08:00, 27 апреля 1962 (мест. время)

Место: о. Рождества

Тип взрыва: воздушный, выс 1501 м.

Мощность: 1.09 Мт

IRM-RMMSO: JE62-00-739



Испытание: Dominic - Bighorn

Дата: 05:19, 27 июня 1962

Место: 48 км к югу от острова Рождества

Тип взрыва: воздушный, выс. 3543 м.

Мощность: 7.6 Мт





Испытание: Starfish Prime ("Морская звезда")  
Время: 23:00, 8 июля 1962 (мест. время)  
Место: Тихий океан, атолл Джонстон  
Тип взрыва: космический, высота 400 км.  
Мощность: 1.4 Мт



Hardtack - ORANGE, 13  
августа 1958 года.  
Испытание W-39 "Warhead".  
Высота взрыва: 42 км.  
Мощность: 3.8 Мт.



Hardtack ТЕАК, 1 августа 1958 года.

Испытание W-39 "Warhead".

Высота взрыва: 76 км.

Мощность: 3.8 Мт.



Испытание: Castle Romeo

Время: 18:30, 26 марта 1954 (GMT)

06:30, 27 марта 1954 (мест. время)

Место: На барже, над кратером от Bravo

Тип взрыва: контактный (4 м высоты)

Мощность: 11 Мт



Испытание: Castle Bravo

Время: 18:45, 28 Февраля 1954 (GMT) 06:45, 1 Марта 1954 (мест. время)

Место: искусственный остров на рифе в 885 м от о-ва Nam ("Charlie"), атолл Бикини

Тип взрыва: контактный

Мощность: 15 Мт

# **Взаимодействие ионизирующих излучений с преградой**

## **Основные задачи, стоящие при проведении моделирования:**

- 1) Константное обеспечение моделирования процессов взаимодействия излучений с веществом.
- 2) Методы решения уравнения переноса ионизирующих излучений в преградах и программная реализация этих модулей.

# **Физические процессы взаимодействия излучений с веществом:**

- 1) Рентгеновские кванты и гамма-кванты.
  1. Фотоэффект.
  2. Релеевское (когерентное) рассеяние.
  3. Комptonовское (некогерентное) рассеяние.
  4. Образование электрон-позитронных пар.
- 2) Нейтроны.
  1. Упругое рассеяние.
  2. Неупругое рассеяние.
  3. Радиационный захват.
  4. Захват с испусканием частиц.
  5. Деление ядер.



# Константное обеспечение моделей:

Ядерно-физические константы:

- 1) Микроуровневые (для отдельных изотопов).
- 2) Макроуровневые (для веществ).

**Библиотеки:**

- 1) БРОНД (Центр по ядерным данным, Россия).
- 2) ENDF/B (Брукхейвенская национальная лаборатория, США).
- 3) ENDL (Ливерморская национальная лаборатория, США).
- 4) JENDL (Японский комитет по ядерным данным).

## **Подготовка ядерно-физических констант:**

- 1) Сбор и оценка элементарных сечений взаимодействий.
- 2) Формирование файлов оцененных сечений.
- 3) Переработка оцененных элементарных сечений в групповые микроконстанты для отдельных элементов.
- 4) Корректировка групповых микроконстант по результатам базовых экспериментов.
- 5) Расчёт групповых макроконстант для материалов.
- 6) Формирование рабочих форматов макроконстант для конкретных моделей прохождения излучений в преградах.

Воронков А.В., Гайфулин С.А., Журавлев В.И., Кондурушкин Н.А., Манаков С.Ф., Шаховский В.В. «Универсальная система константного обеспечения расчёта переноса нейтронов, фотонов и заряженных частиц». 12 ЦНИИ МО РФ, ИМП им. М.В. Келдыша РАН.

Входящие библиотеки:

- 1)БНАБ-78.
- 2)БНД-49.
- 3)БВФ(49+15).
- 4)CASK.
- 5)VITAMIN-C.
- 6)АРАМАКО-G.
- 7)АДАМ (поля электронов).

# Уравнение переноса ионизирующих излучений в преградах

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{v(E)} \frac{\partial \varphi(\vec{r}, t, E, \vec{\Omega})}{\partial t} + \vec{\Omega} \vec{\nabla} \varphi(\vec{r}, t, E, \vec{\Omega}) + \Sigma_t(\vec{r}, t, E) \varphi(\vec{r}, t, E, \vec{\Omega}) = \\
 & = \int_E^{+\infty} dE' \int_{4\pi} d\vec{\Omega}' \left[ \Sigma_S(\vec{r}, t, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \varphi(\vec{r}, t, E', \vec{\Omega}') \right] + Q(\vec{r}, t, E, \vec{\Omega}); \\
 & \varphi(\vec{r}, t, E, \vec{\Omega}) \Big|_{t=t_0} = \varphi_0(\vec{r}, E, \vec{\Omega}); \\
 & \varphi(\vec{r}, t, E, \vec{\Omega}) \Big|_{\vec{r}=\vec{r}_0} = \int_{\vec{r}' E'} \int R(\vec{r}' \rightarrow \vec{r}, t, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \varphi(\vec{r}', t, E', \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' dE'; \\
 & Q_{\gamma, \text{ЭТ}}(\vec{r}, t, E_\gamma, \vec{\Omega}) = \int_0^{+\infty} dE_n \int_{4\pi} d\vec{\Omega}' \left[ \Sigma_{n, X\gamma}(\vec{r}, t, E_n, E_\gamma, \vec{\Omega}) + \Sigma_{n, \gamma}(\vec{r}, t, E_n, E_\gamma, \vec{\Omega}) \right] \times \\
 & \times \varphi(\vec{r}, t, E, \vec{\Omega}');
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\frac{1}{v(E)} \frac{\partial \phi^+(\vec{r}, t, E, \vec{\Omega})}{\partial t} - \vec{\Omega} \vec{\nabla} \phi^+(\vec{r}, t, E, \vec{\Omega}) + \Sigma_t(\vec{r}, t, E) \phi^+(\vec{r}, t, E, \vec{\Omega}) =$$

$$= \int_E^{+\infty} dE' \int_{4\pi} d\vec{\Omega}' \left[ \Sigma_S(\vec{r}, t, E \rightarrow E', \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') \phi^+(\vec{r}, t, E', \vec{\Omega}') \right] + Q(\vec{r}, t, E, \vec{\Omega});$$

$$\phi^+(\vec{r}, t, E, \vec{\Omega}) \Big|_{t=t_0} = \phi_0^+(\vec{r}, E, \vec{\Omega}); \quad (2)$$

$$\phi^+(\vec{r}, t, E, \vec{\Omega}) \Big|_{\vec{r}=\vec{r}_0} = \int_{\vec{r}' E'} \int R(\vec{r} \rightarrow \vec{r}', t, E \rightarrow E', \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') \phi^+(\vec{r}', t, E', \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' dE';$$

$$Q_{\gamma, \text{eT}}(\vec{r}, t, E_\gamma, \vec{\Omega}) = \int_0^{+\infty} dE_n \int_{4\pi} d\vec{\Omega}' \left[ \Sigma_{n, X\gamma}(\vec{r}, t, E_n, E_\gamma, \vec{\Omega}) + \Sigma_{n, \gamma}(\vec{r}, t, E_n, E_\gamma, \vec{\Omega}) \right] \times$$

$$\times \phi^+(\vec{r}, t, E, \vec{\Omega}');$$

## Применение метода Монте-Карло

- 1) Моделируется вылет частицы из источника («псевдочастицы» из детектора для сопряженного уравнения).
- 2) Разыгрывается длина свободного пробега.
- 3) Определяются вероятности направление рассеяния.

Таким образом моделируются траектории частиц для прямого уравнения и потоки ценности для сопряженного.

Затем составляется статистика для большого числа траекторий.

# Метод Монте-Карло решения прямого уравнения переноса излучения

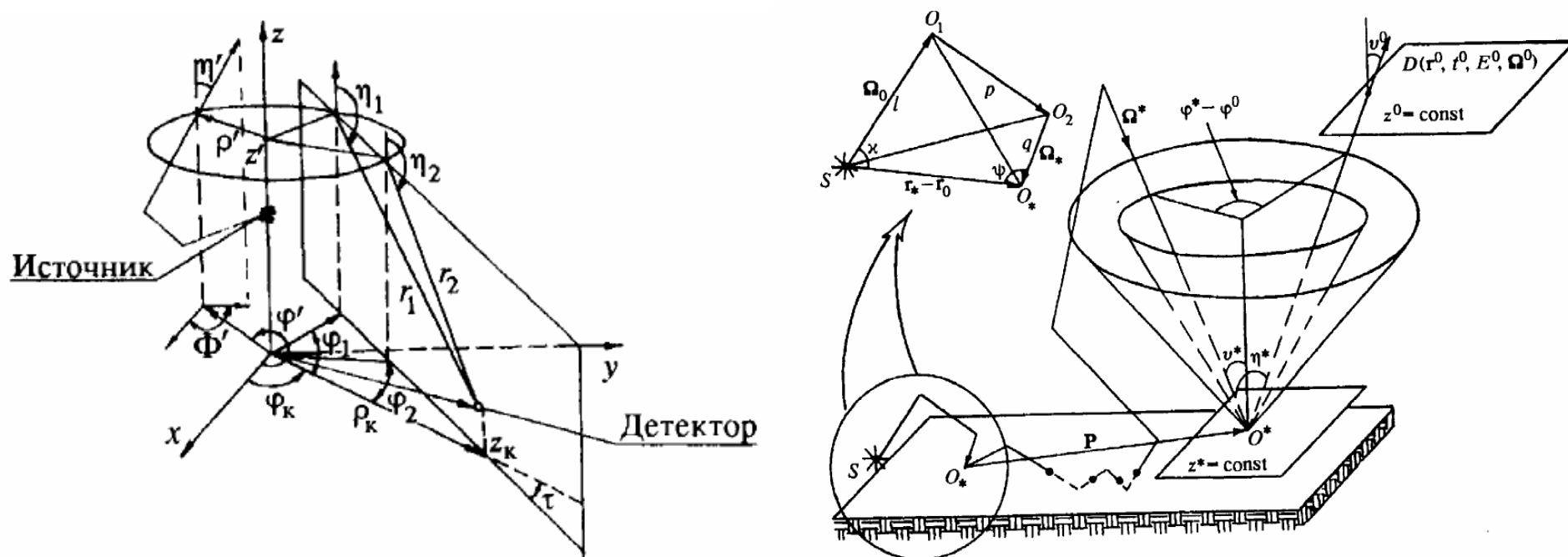


Рис. 1. Геометрия метода.

Слева: получение локальной оценки прямым методом.

Справа: получение локальной оценки с применением промежуточного объёмного источника.

Плотность тока в детекторе в однородной среде:

$$\varphi(R_k, \Delta t_l, \Delta E_m) = \frac{1}{4\pi R_k^2 \Delta t_l \Delta E_m N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} W_j f_{klm} \frac{\exp(-\Sigma_r |\mathbf{r}_j|)}{|\cos \alpha_j|} \quad (4)$$

Локальная осесимметричная оценка:

$$L_\tau = W \sum_{i=1}^n \frac{\exp[-\alpha(r_i)]}{r_i^2} \frac{g(\mu_{si})}{4\pi^2} \frac{\sqrt{\rho_k^2 + \rho'^2 - 2\rho_k \rho' \cos \varphi_i}}{\sqrt{\rho'^2 - \rho_k^2 \sin^2 \tau}} W(\tau), \quad (5)$$

$$n = \begin{cases} 1, & \rho' > \rho_k, \\ 2, & \rho' \leq \rho_k, \end{cases}$$

$$r_i = \sqrt{(z_k - z')^2 + \rho_k^2 + \rho'^2 - 2\rho_k \rho' \cos \varphi_i},$$

$$\mu_{si} = \gamma_i \gamma' + \sqrt{1 - \gamma_i^2} \sqrt{1 - \gamma_i'^2} \cos(\tau + \Phi' - \varphi' + \varphi_i),$$

$$\gamma' = \cos \eta',$$

$$\gamma_i = \cos \eta_i = (z_k - z')/r_i,$$

$$W(\tau) = \begin{cases} \pi, & \rho' > \rho_k, \\ \frac{2\sqrt{\rho'^2 - \rho_k \rho' \sin \tau}}{\rho_k \cos \tau}, & \rho' \leq \rho_k, \end{cases}$$



## Построение функции Грина задачи переноса излучения

$$G_2^{kk}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}) = \sum_{j=1}^2 c \Sigma_k(\mathbf{r}_0 + l \mathbf{\Omega}_0, \alpha_0 \rightarrow \alpha_1) \Sigma_k(\mathbf{r} - q_j \mathbf{\Omega}, \alpha_1 \rightarrow \alpha) \frac{m_e c^2}{E^2} \chi_f(W_j) \times$$

$$\times \frac{\exp[-\tau(\mathbf{r}_0 \rightarrow \mathbf{r}_0 + l_j \mathbf{\Omega}_0, E_0) - \tau(\mathbf{r}_0 + l_j \mathbf{\Omega}_0 \rightarrow \mathbf{r} - q_j \mathbf{\Omega}, E_1) - \tau(\mathbf{r} - q_j \mathbf{\Omega} \rightarrow \mathbf{r}, E)]}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0| \sqrt{D_1}},$$

$$x = \{\mathbf{r}, t, E, \mathbf{\Omega}\} \quad \mathbf{\Omega} = \{\varphi, \vartheta\}, \quad \alpha_0 = m_e c^2 / E_0,$$

$$\alpha_1 = m_e c^2 / E_1 = 1 + \alpha_0 - (\cos \kappa - u_j - w_j \cos \beta) / h, \quad \alpha = m_e c^2 / E, \quad \cos \beta = \mathbf{\Omega} \mathbf{\Omega}_0,$$

$$Q = 2 - \alpha + \alpha_0, \quad -2 \leq Q \leq 2, \quad R = 1 + \cos \beta \quad 0 \leq R \leq 2,$$

$$h = (\cos \kappa + \cos \psi - kR) / (Q - R), \quad u_i = k - h - w_i,$$

$$\chi_f(W_j) = \begin{cases} 1, & w_j \in W_j, \\ 0, & w_j \notin W_j, \end{cases} \quad (6)$$

$w_j$  — решение уравнения

$$2w^2(2 - R)(Q - R) -$$

$$- 2w[kQ(2 - R) - \cos \psi(2 - Q) - \cos \kappa(2 - R) - \cos \kappa(Q - R)] -$$

$$- 2(k - \cos \kappa)(\cos \kappa + \cos \psi - kR) + (k^2 - 2k \cos \kappa + 1)(Q - R) = 0,$$

$$D_1 = \cos^2 \kappa (2 - Q)^2 -$$

$$- 2 \cos \kappa [k(2R - Q^2)(2 - R) + \cos \psi (2(Q - R)^2 - (2 - Q)^2)] +$$

$$+ (2 - R)[(2R - Q^2)k(kR - 2 \cos \psi) - 2(Q - R)^2] + \cos^2 \psi (2 - Q)^2,$$

$$\tau(\mathbf{r}' \rightarrow \mathbf{r}, E) = \int_0^{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \Sigma_j \left( \mathbf{r} - l \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}, E \right) dl \quad \text{— оптическая толщина среды}$$

## Многokrатное рассеяние

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}_{>2}(x^0) = & \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{s=1}^2 Q_{ij}^s \chi \left( \frac{z^0 - z^*}{\cos \vartheta^0} \right) \frac{\Sigma_t(\mathbf{r}_{*sij}, E_j) v(\mathbf{\Omega}_{0ij})}{\Sigma_t(\mathbf{r}_{ij}^*, E_{ij}^*) f_1(\mathbf{\Omega}_{0ij}) f_4(\cos \vartheta_j')} \times \\ & \times \frac{\Sigma_K(\mathbf{r}_{ij}^*, \alpha_{ij}^* \rightarrow \alpha^0) \exp[-\tau(\mathbf{r}_{ij}^* \rightarrow \mathbf{r}_0, E^0)] [\chi(\alpha_{ij}^* - \alpha_0) - \chi(\alpha_{ij}^* - \alpha^0 - 2)]}{f_2(z_i') f_3(E_i') |\cos \vartheta^0| (|\cos \eta_{ij}^* - \cos(\vartheta^0 - \vartheta_{ij}^*)| |\cos(\vartheta^0 + \vartheta_{ij}^*) - \cos \eta_{ij}^*|)^{1/2}} \times \\ & \times \left( \frac{\alpha^0}{\alpha_{ij}^*} \right)^2 G_2(\mathbf{r}_0, t_0, E_0, \mathbf{\Omega}_{0ij}, \mathbf{p}_{*sij}, z_i', t_{*ij}, E_i', \varphi_{*sij}, \vartheta_i'), \end{aligned}$$

$$\mathbf{p}_{*s} = \mathbf{p}^* - [p \cos(\varphi_s^* - \varphi + \beta_p) \mathbf{i} + p \sin(\varphi_s^* - \varphi + \beta_p) \mathbf{j}],$$

$$p = \sqrt{|\mathbf{p}|^2 + |\mathbf{p}_1|^2 - 2|\mathbf{p}||\mathbf{p}_1| \cos(\beta - \beta_1)},$$

$$\cos \beta_p = \frac{|\mathbf{p}| \cos \beta - |\mathbf{p}_1| \cos \beta_1}{p}, \quad \sin \beta_p = \frac{|\mathbf{p}| \sin \beta - |\mathbf{p}_1| \sin \beta_1}{p},$$

$$\varphi_{*s} = \varphi_s^* + \beta_p + \varphi_1 \quad (\text{индексы } i, j \text{ опущены}),$$

$$t_* = t^0 - \frac{z^0 - z^*}{c \cos \vartheta^0} - t + t_1 \quad (\text{индексы } i, j \text{ опущены}),$$

$$\begin{aligned} \mathbf{r}^* = x^* \mathbf{i} + y^* \mathbf{j} + z^* \mathbf{k} = & \left[ x^0 - \frac{\sin \vartheta^0 \cos \varphi^0}{\cos \vartheta^0} (z^0 - z^*) \right] \mathbf{i} + \\ & + \left[ y^0 - \frac{\sin \vartheta^0 \sin \varphi^0}{\cos \vartheta^0} (z^0 - z^*) \right] \mathbf{j} + z^* \mathbf{k}, \end{aligned}$$

$$\cos \eta_{ij}^* = 1 - \alpha^0 + \alpha_{ij}^*,$$

$$\varphi_s^* = \varphi^0 + (-1)^s \arccos \left( \frac{\cos \eta_{ij}^* - \cos \vartheta^* \cos \vartheta^0}{\sin \vartheta^* \sin \vartheta^0} \right), \quad s = 1, 2.$$

(7)

## Описание геометрии системы

1. Специализированные геометрические модули.
2. Универсальные геометрические модули.
  - 1) Использование замкнутых простых объёмов.

MORSE (Окриджская национальная лаборатория, США).

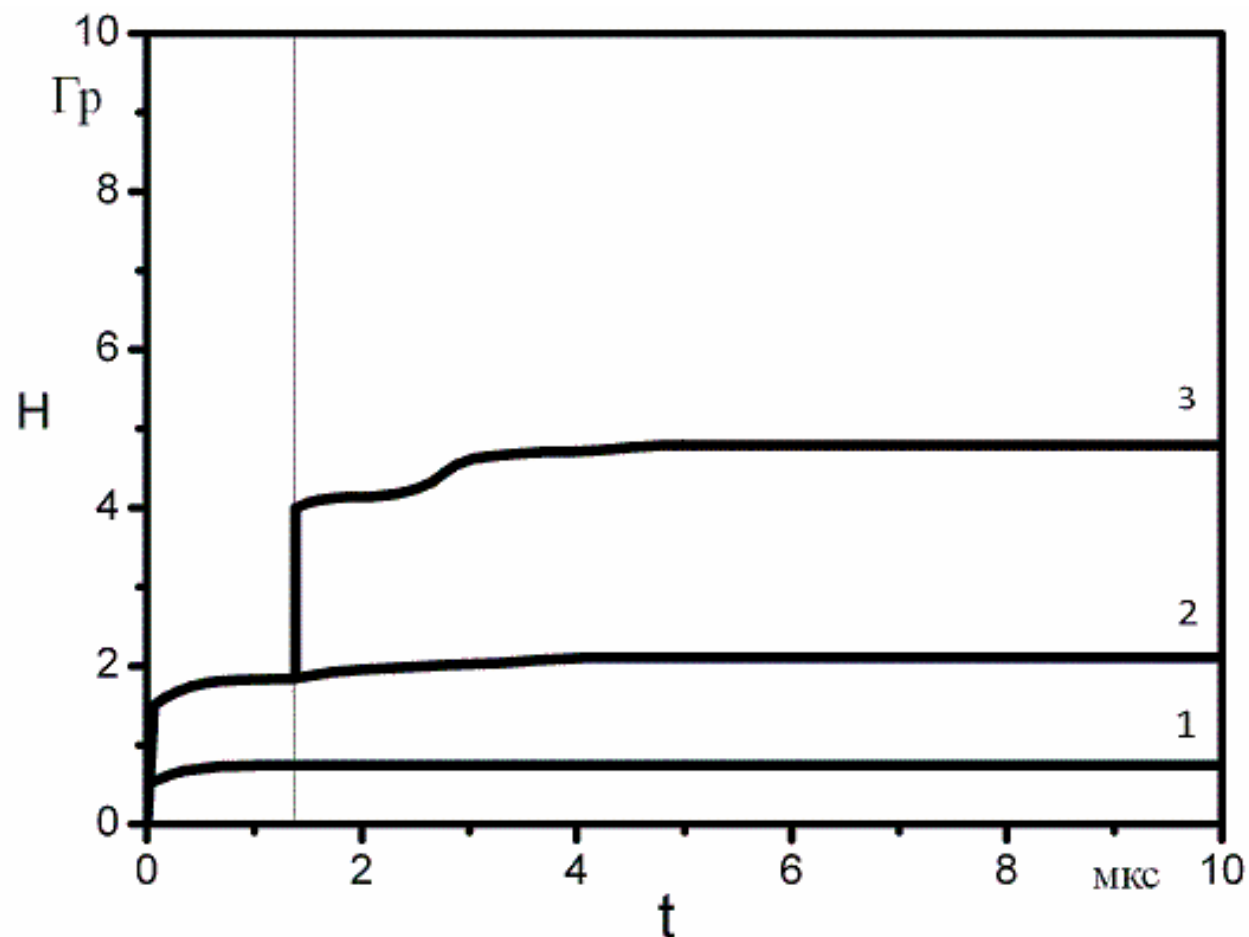
MCU-GDL (Российский научный центр «Курчатовский институт», Россия).
  - 2) Использование типовых поверхностей.

MCNP (Лос-Аламосская национальная лаборатория, США).

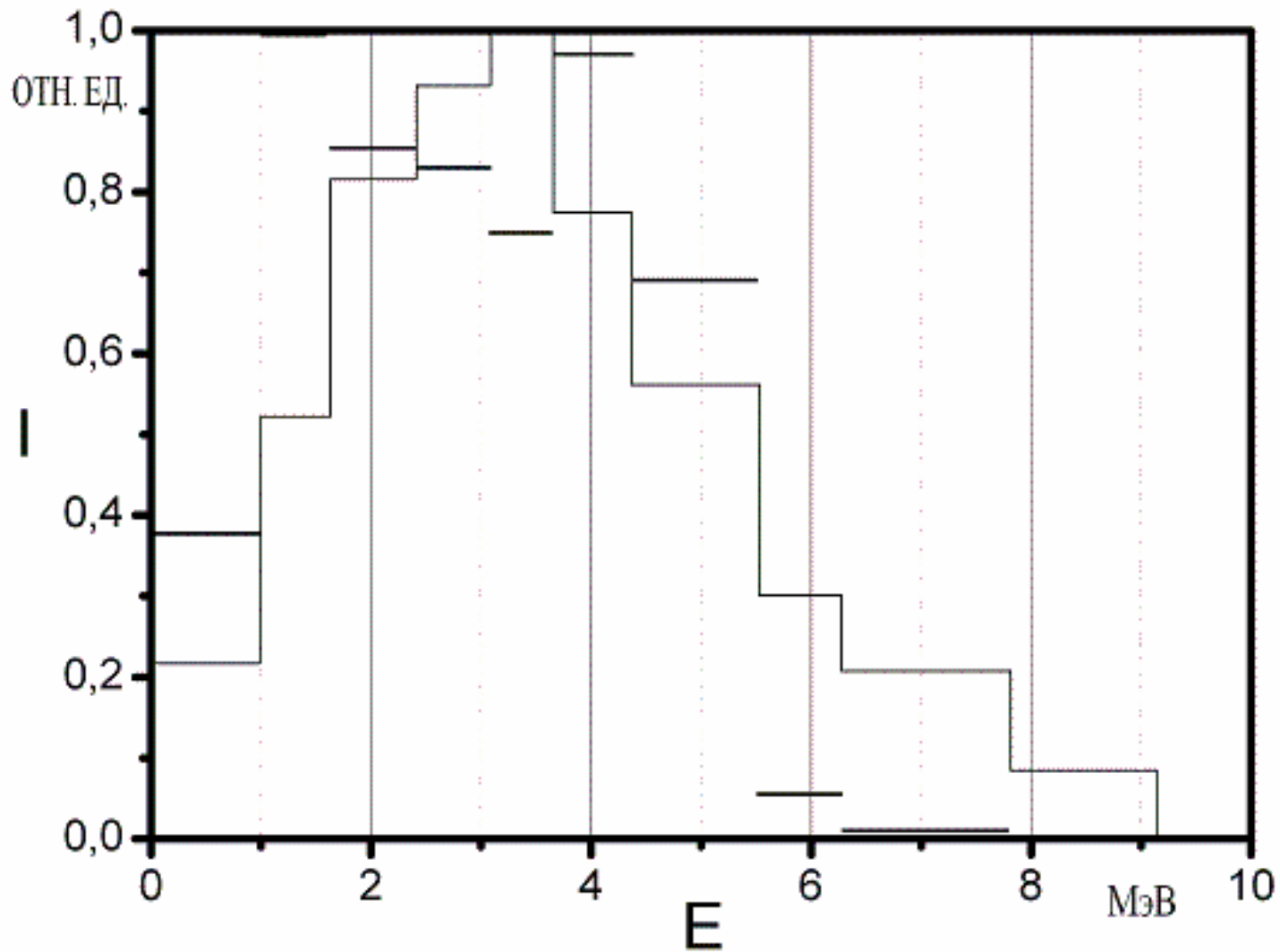
FASTER (Окриджская национальная лаборатория, США).

## **В данной работе использовалось:**

- 1) Многогрупповая библиотека сечений для фотонов и библиотека ядерно-физических констант JENDL для сечений реакций нейтронов.
- 2) Метод Монте-Карло реализовывался для сопряженного уравнения переноса.
- 3) Использовались методы введения корректирующих функций для устранения нарастания дисперсии и методы введения нефизических индикатрис выхода с компенсацией через статистический вес.
- 4) Использовался универсальный геометрический модуль, аналогичный по устройству с MCNP (Лос-Аламосская национальная лаборатория, США).



**Рис. 2.** Поглощенная доза во всех элементах транзистора при действии на радиоэлектронное устройство: 1 – ЯВУ атомного типа с ЭВ 10 кт, 2 – ЯВУ атомного типа с ЭВ 100 кт, 3 – ЯВУ термоядерного типа с ЭВ 700 кт.



**Рис. 3.** Изменение спектра гамма-квантов при прохождении пластины из вольфрамового сплава толщиной  $5 \text{ г/см}^2$ . Тонкая линия – начальный спектр, толстая линия – спектр прошедшего излучения.

## **Выводы:**

- 1) Произведён обзорный доклад о современных методах моделирования взаимодействия проникающих излучений с корпусами и внутренними элементами РЭО.
- 2) Разработана и реализована модель взаимодействия проникающих излучений с корпусами и внутренними элементами РЭО.