

**Л.В. Евсеенко, А.А. Куракин, А.В. Тултаев, А.П. Черняев**

**Математическая модель фантома человека  
в радионуклидной диагностике и терапии**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2002 – 24/708

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. М.В. ЛОМОНОСОВА  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА

**Л.В. Евсеенко, А.А. Куракин, А.В. Тултаев, А.П. Черняев**

**Математическая модель фантома человека  
в радионуклидной диагностике и терапии**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2002 – 24/708

УДК 615.849.1+616-073.75

ББК 53.4

М34

**Evseenko L.V., Kurakin A.A., Tultaev A.V., Chernyaev A.P.**

E-mail address: luda\_evseenko@mail.ru

## **The mathematical description of the male's phantom in radionuclide diagnostic and therapy**

Preprint NPI MSU – 2002 – 24/708

Abstract:

The authors have developed the computing male's phantom, including models of skeleton and soft-tissue organs. Calculating absorbed doses in the organs have been completed with the point-source kernel method for the patients of different ages and they have been compared with the known table data MIRD.

**Евсеенко Л.В., Куракин А.А., Тултаев А.В., Черняев А.П.**

## **Математическая модель фантома человека в радионуклидной диагностике и терапии**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2002 – 24/708

Аннотация:

Авторами разработан компьютерный фантом человека, включающий в себя модели скелета и внутренних органов. Методом точечного источника были выполнены расчеты поглощенных доз облучения органов разных по возрасту пациентов и проведено сравнение их с известными табличными данными MIRD (Medical Internal Radiation Dose).

© Евсеенко Л.В., 2002

© Куракин А.А., 2002

© Тултаев А.В., 2002

© Черняев А.П., 2002

© НИИЯФ МГУ, 2002

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	3
<b>МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ</b> .....	6
1. МЕТОДЫ РАДИОМЕТРИИ ВСЕГО ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА И СИЧ .....	6
2. МЕТОД МОНТЕ-КАРЛО .....	8
3. MIRD – ФОРМАЛИЗМ .....	12
4. МЕТОД ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА .....	13
<b>РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ</b> .....	17
1. РАСЧЕТ ФАНТОМА ЧЕЛОВЕКА .....	17
2. РАСЧЕТ ФАНТОМА СКЕЛЕТА ЧЕЛОВЕКА .....	18
3. РАСЧЕТ ФАНТОМА ВНУТРЕННИХ ОРГАНОВ .....	20
4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ .....	22
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	26
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ</b> .....	27
1. СКЕЛЕТ ЧЕЛОВЕКА .....	27
2. ВНУТРЕННИЕ ОРГАНЫ ЧЕЛОВЕКА .....	35
3. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОРГАНОВ ЧЕЛОВЕКА .....	62
<b>ЛИТЕРАТУРА</b> .....	63

## ВВЕДЕНИЕ

Успехи в области изучения ядерной физики сделали возможным применение ионизирующего излучения в различных областях научных исследований, в том числе биологии и медицине. Радиоактивные изотопы в настоящее время широко применяются при диагностических исследованиях и в лечебной практике в качестве радиофармацевтических препаратов, включающих в себя различные активные химические ингредиенты, в одну из химических структур которых включены различные радионуклиды [1, 2]. Одной из задач оценки клинко-диагностической значимости диагностических радиофармпрепаратов (РФП) является оценка их радиационной безвредности для пациентов.

Основной задачей оценки клинко-терапевтической значимости РФП, применяемых с лечебной целью, является определение соотношения поглощенных доз излучения РФП в патологическом органе к дозам облучения в других органах и тканях, а также всего тела человека. Современные методы расчетов поглощенных доз излучения радионуклидов, вводимых в организм больного, с погрешностью 50-100% удовлетворяют требованиям гигиенической дозиметрии, но никак не требованиям радионуклидной терапии (современные требования 10-20%).

Радиоактивные вещества могут случайно проникать в организм человека в результате профессионального или какого-либо другого хронического воздействия [1]. Поэтому задачей медицинских физиков является также оценка гигиенических доз с целью обеспечения радиационной безопасности как профессиональных работников, так и населения в обычных условиях и при радиационных авариях. Изотопы могут попадать в организм человека через органы дыхания, пищеварения, поврежденную или неповрежденную кожу, а также путем инъекций при диагностических и лечебных процедурах [1].

Диапазон клинических методов исследований в диагностике и терапии, применяемых в настоящее время, очень широк. Практически функции почти всех органов и систем организма могут быть исследованы при помощи метода радиоиндикации [2].

Большое значение имеют радиодиагностические исследования в онкологии при диагностике локализации злокачественных образований и метастазов. Все эти методы диагностики и терапии не имеют смысла без определения с погрешностью хотя бы 20% выделившейся энергии излучения на единицу массы в органах и всем теле пациентов.

В настоящее время для определения доз внутреннего облучения принят расчетный метод, поскольку прямые измерения поглощенной дозы излучения РФП, даже в полых органах, доступных для введения внутрь современных дозиметрических средств, травматичны. В большинстве органов и тканей прямые измерения доз излучения РФП невозможны без нарушения их целостности. Утвердившийся среди медицинских физиков подход к расчетам поглощенных и эквивалентных доз излучения РФП в органах и всем теле пациента, называемый MIRD-формализмом (Medical Internal Radiation Dose) или MIRD-методом, включает:

1. Экспериментальное определение количества распавшихся ядер радионуклида (интегральную активность) в органах-источниках, обладающих тропностью к РФП.

2. Расчет поглощенных доз по данным интегральной активности и спектрам излучения радионуклидов РФП в органах-источниках и органах-мишенях условного человека с использованием специфических дозиметрических величин – удельных поглощенных фракций [3 - 8].

Интегральную активность радионуклидов в органах и тканях пациентов вычисляют по данным фармакокинетики РФП с помощью внешних для пациента радиометрических приборов и установок [6, 9]. Фармакокинетика –

это динамика распределений РФП по органам и тканям в зависимости от времени.

Удельные поглощенные фракции, определяемые как отношение энергии, поглощенной в единице массы органа-мишени, к энергии, излучаемой из органа-источника, рассчитываются по методу Монте-Карло с использованием математической модели анатомического строения усредненного по массам и взаимным расположениям органов “стандартного человека” – фантома. Фантомы человека разных возрастов разрабатываются с 60-х годов и до настоящего времени уточняются и совершенствуются [10 - 12].

Данные спектральных характеристик, энергии и интенсивности излучения радионуклидов также постоянно уточняются и публикуются Международной комиссией по радиационной защите (МКРЗ) [13, 14].

В реальных условиях значения поглощенных доз каждого отдельного пациента могут значительно отличаться от расчетных данных с использованием фантома “стандартного человека”.

Целью настоящей работы является математическое моделирование фантома человека и его внутренних органов, а также сравнительный анализ методов расчета поглощенных доз в органах и тканях при внутреннем облучении: принятого с использованием фантома “стандартного человека” и табличных данных поглощенных фракций, рассчитанных по методу Монте-Карло, и метода точечного источника, с помощью которого можно проводить расчеты поглощенных доз для пациентов, анатомические характеристики которых отличаются от “стандартного человека”.

# МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

## 1. МЕТОДЫ РАДИОМЕТРИИ ВСЕГО ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА И СИЧ

Основой для оценки качества и фундаментальной пригодности РФП являются данные о количественном распределении их по шкале времени в органах и во всем теле человека, то есть фармакокинетика РФП.

Исследование фармакокинетики РФП проводилось с помощью счетчика излучения человека (СИЧ), включающего в себя сцинтилляционный детектор с кристаллом NaI диаметром 90 мм и высотой 40 мм. Детектор располагается над центром кровати пациента на расстоянии 2,8 м. В качестве регистрирующего устройства был использован многоканальный амплитудный анализатор импульсов NTA-1024 (Венгрия) и специализированная ЭВМ-приставка к нему EMG-666 (Венгрия) [9].

Относительное содержание радионуклида в органах пациента в зависимости от времени с момента внутривенного введения препарата определялось способом счета излучения всего тела с последовательным экранированием отдельных его участков – проекций органов.

В дополнение к СИЧ использованы передвижные сцинтиблоки для динамической записи на потенциометрах графиков зависимости от времени накопления и выведения РФП в проекциях отдельных органов пациента. В процессе изучения фармакокинетики также использовались гамма-камеры для разделения накладывающихся в одной проекции различных органов пациента.

Содержание препарата в крови, относительно введенного, измерялось с помощью колодцевого счетчика (детектор в виде колодца), показания которого градуировали по показаниям результатов измерения активности шприца с РФП, а затем измеряли активности проб крови, взятых у пациента в разное время. Измерения активности РФП в шприце, остаточной активности пустого шприца



после введения препарата, а также активностей проб крови делались с поправкой на распад радионуклида во времени. На рис. 1 представлена схема измерения излучения всего тела и отдельных органов человека.

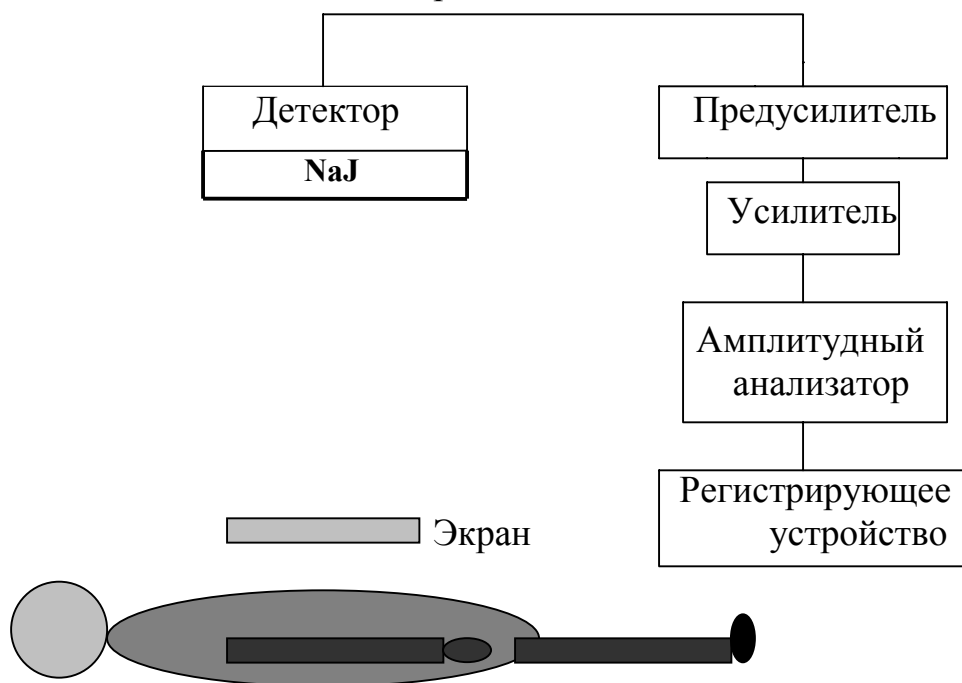


Рис. 1. Схема измерения излучения всего тела и отдельных органов человека.

Измерения активности органов методом экранирования проводились в двух позициях – спереди и сзади с одной временной экспозицией, что позволило снизить эффект экранирования излучения тканями тела пациента [9]. Относительное содержание РФП (в %) в исследуемых органах вычислялось по скорости счета излучения над органами относительно скорости счета излучения всего тела по формулам:

$$k = \frac{N_{орг}}{N_{вт}} \cdot \exp\left(\frac{0.693}{T_{1/2}} \cdot t\right) \times 100\% \quad (1).$$

Скорость счета над органом определялась как:

$$N_{орг} = N_{вт} - N_{вт(э)} \quad (2),$$

где  $N_{вт}$  – скорость счета излучения всего тела;

$N_{вт(э)}$  – скорость счета излучения всего тела при экранировании органа;

$N_{\text{орг}}$  – скорость счета излучения органа;

$T_{1/2}$  – период полураспада радионуклида;

$t$  – время от момента введения РФП.

Суммарное выражение содержания РФП в органах по результатам измерений двух позиций:

$$K = \left( \frac{N_{\text{вг}} - N_{\text{вг}(\ominus)}}{N_{\text{вг}}} \right)_n^{1/2} \cdot \left( \frac{N_{\text{вг}} - N_{\text{вг}(\ominus)}}{N_{\text{вг}}} \right)_z^{1/2} \cdot \exp\left(\frac{0.693}{T_{1/2}} \cdot t\right) \times 100\% \quad (3).$$

Здесь индексы  $n$  и  $z$  обозначают переднюю и заднюю проекции.

Интегральная активность представляет собой площадь под кривой, отражающей динамику распределения активности РФП в каждом органе по времени. Зная интегральную активность как количество распадов радионуклидов в каждом органе источнике и используя схемы распадов, определяют суммарную энергию как проникающего фотонного, так и непроникающего электронного и  $\alpha$ -излучения [9].

Учитывая то, что каждый орган-источник, испускающий фотоны, облучает как себя, так и другие органы, необходимо определить суперпозицию взаимного облучения. Для этой цели по схеме MIRD (Medical Internal Radiation Dose), разработанной Американской ассоциацией медицинских физиков, используются специфические дозиметрические величины – поглощенные фракции, рассчитанные методом Монте-Карло [7].

## 2. МЕТОД МОНТЕ-КАРЛО

Большинство практических задач, связанных с прохождением излучения через вещество, с достаточно высокой точностью решаются методом Монте-Карло [15,16]. Этому способствовал статистический характер описания взаимодействия  $\gamma$ -квантов с веществом [15].

В приложении к физике метод Монте-Карло можно определить как метод исследования физического процесса путем создания и эксплуатации стохастической модели, отражающей динамику данного процесса [17].

На основании данных эксперимента с определенной погрешностью известна вероятность перехода частиц из одного состояния в другое в фазовом пространстве характеристик

(координат) частицы. Это дает возможность моделировать «историю» конкретной частицы, так что, рассматривая достаточно большое количество таких историй, можно полностью восстановить картину прохождения излучения через вещество, соответствующую нашим представлениям о реальном процессе. Это, очевидно, дает возможность проверить и уточнить эксперимент, а во многих случаях отказаться от эксперимента и заменить его расчетом [15].

При решении задач методом Монте-Карло предполагается, что частицы не взаимодействуют друг с другом, и вероятность перехода частицы в каждое последующее состояние зависит только от предыдущего.

В задаче прохождения частиц через вещество реализация метода сводится к построению большого количества траекторий частиц, представляющих некоторые ломаные линии, прямолинейные участки которых характеризуют свободные пробеги до столкновений. Этот пробег, а также результат столкновения, то есть новое состояние частицы (направление движения и энергия рассеянных частиц первичного пучка и вторичных частиц), являются случайными величинами, описываемыми соответствующими вероятностными распределениями. Конкретная реализация величин, определяющих состояние частиц, выполняется с помощью розыгрышей этих распределений. Полученные таким образом результаты конечной выборки (N-траекторий) обрабатываются статистическими методами [15, 18].

Рассмотрим в общих чертах моделирование методом Монте-Карло задачи о прохождении  $\gamma$ -квантов через вещество [15 – 18, 19].

Будем считать, что состояние  $\gamma$ -кванта характеризуется пространственными координатами  $\mathbf{r} = (x, y, z)$ , направлением полета  $\mathbf{\Omega}$  (единичным вектором с компонентами угла  $u, v, w$ ) и энергией  $E$  или, для кратности, вектором  $X = (x, y, z, u, v, w, E)$ . Первый этап состоит в моделировании источника излучения. Задается функция плотности вероятности  $G(X)$ , характеризующая источник, и реализуется случайная величина  $X_0$  в соответствии с функцией  $G(X)$ .

Моделирование перехода  $\gamma$ -кванта в состояние  $X_1$  разбивают на несколько этапов:

1. определяют расстояние, которое проходит  $\gamma$ -квант в веществе до точки следующего взаимодействия  $\mathbf{r}_1$ , и находят координаты  $x_1, y_1, z_1$ , проверяют, не покинул ли  $\gamma$ -квант интересующую область;
2. определяют тип взаимодействия  $\gamma$ -квантов с веществом в соответствии с заданными вероятностями при энергии  $E$ ;
3. в соответствии с этим регистрируют либо гибель  $\gamma$ -квантов, либо рождение пары  $e^-$  и  $e^+$ , либо рассеяние  $\gamma$ -кванта;
4. определяют угол рассеяния и новую энергию рассеянного  $\gamma$ -кванта, то есть  $\mathbf{\Omega}_1$  и  $E_1$ , либо направление полета  $\mathbf{\Omega}_1'$  и энергию  $E_1'$  каждого из пары родившихся  $\gamma$ -квантов.

Затем процедуру повторяют для первичной частицы, имеющей вместо начальных угла и энергии – разыгранные значения до тех пор, пока энергия частицы не станет меньше некоторой минимальной величины  $T_g$ , при которой ее можно считать поглощенной в мишени, или частица не покинет мишень. В последнем случае фиксируются ее энергия и направление движения. Вторичные частицы (атомы отдачи, электроны, фотоны тормозного излучения, продукты ядерных взаимодействий) прослеживаются по аналогичной схеме с использованием для каждого вида излучения своих вероятностных законов взаимодействия.

Кроме совершенно очевидного фактора больших затрат машинного времени реализация конечной выборки из N-траекторий не гарантирует возможности учета маловероятных, но

представляющих подчас наибольший интерес событий. В этих случаях принимают искусственные закономерности, цель которых – повышать вес таких редких событий. При этом процедуры Монте-Карло должны быть такими, чтобы использование смещенных распределений обеспечило несмещенные оценки интересующих нас величин.

Метод Монте-Карло применяется в физике элементарных частиц, нейтронной физике, квантовой теории поля, в статистической физике, ядерной геофизике, аэро- и гидродинамике и других областях науки [17].

Метод Монте-Карло обладает рядом достоинств [15 – 18, 19]. В настоящее время этот метод является основным средством решения задач переноса излучения в средах со сложной геометрией, в условиях энергетической зависимости сечений и неизотропности процессов рассеяния. Метод применим к любым задачам, допускающим статистическое описание, ко многим задачам, сформулированным на детерминистском языке (вычисление интегралов, приближенное решение дифференциальных уравнений и др.). Наличие сильных градиентов потока вблизи границы раздела двух сред, сильно различающихся по плотности, наличие неоднородных примесей, отсутствие симметрии поля излучения и, следовательно, высокая размерность задач заставляют обращаться к методу Монте-Карло. Кроме того, метод выделяется прежде всего строгостью исходных допущений, позволяющей практически точно описывать поведение излучения в сложных средах. Метод максимально приспособлен для использования на ЭВМ.

Хотя для реализации метода Монте-Карло не требуется записи уравнения переноса, каждой его вычислительной схеме соответствует вариант уравнения переноса.

### **3. MIRD – ФОРМАЛИЗМ**

MIRD-формализм (Medical Internal Radiation Dose) или MIRD-метод – принятый медицинскими физиками за рубежом и в нашей стране метод расчета поглощенных и эквивалентных доз излучения диагностических радиофармпрепаратов (РФП) в органах и тканях математически формализованной модели “стандартного человека” с использованием поглощенных фракций.

При расчете поглощенных фракций по методу Монте-Карло необходимо знать взаимные расположения, формы и размеры органов человека.

Формы, размеры и массы органов, рекомендованные Международной комиссией по радиобиологической защите (МКРЗ), были получены при помощи статистической обработки усредненных секционно-анатомических данных,

представленных многими авторами<sup>1</sup> [7, 20]. Каждый орган представляется в виде системы уравнений и неравенств трех независимых переменных и постоянных величин, определяющих координаты центров органов, их размеры, форму и взаимное расположение друг относительно друга [7, 21 - 23]. Эти коэффициенты различны для десятилетнего, пятнадцатилетнего и взрослого человека. Начало системы координат соответствует точке между пятым поясничным позвонком и крестцом. Ось x направлена в сторону левой руки во фронтальной плоскости, ось y – кзади в сагиттальной плоскости, ось z направлена вверх по позвоночному столбу.

Справочным пособием для анализа и расчетов спектральных характеристик излучения всех РФП стала публикация №38 Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) [13].

Расчет поглощенных доз излучения РФП проводился на ЭВМ по разработанной программе, базой данных которой были массы органов, удельные поглощенные фракции, спектральные характеристики излучений радионуклидов и усредненные коэффициенты качества излучений радионуклидов РФП [24, 25].

Конечная формула расчета среднего значения поглощенной дозы в каком-либо органе имеет вид:

$$\overline{D}_k = \sum_j \overline{A}_j \sum_i \Delta_i F_i(V_k \leftarrow V_j) + \frac{\overline{A}_k \Delta_{H.II}}{m_k} \quad (4)$$

$\overline{A}_j$  – суммарное число распадов радионуклида в  $V_j$  объеме, содержащем источник излучения (орган-источник) за время пребывания в нем РФП;

$\Delta_i$  – энергия, излучаемая на один распад радионуклида для каждой линии фотонного спектра излучения;

$\overline{A}_k$  – суммарное число распадов радионуклида в органе-мишени, в котором определяется поглощенная доза;

<sup>1</sup> Значения масс органов, их плотность и атомный состав даны в приложении.

$F_i(V_k \leftarrow V_j)$  – удельная поглощенная фракция – отношение энергии, поглощенной в единице массы органа-мишени с объемом  $V_j$  от источника, к энергии, излучаемой из объема  $V_k$  органа-источника для каждой  $i$ -ой линии фотонного спектра излучения;

$\Delta_{н.и}$  – энергия, излучаемая на один распад для всех непроникающих излучений, включающих бета-частицы, электроны внутренней конверсии, электроны Оже и характеристическое фотонное излучение с энергиями менее 10 кэВ;

$m_k$  – масса органа-мишени [9].

#### 4. МЕТОД ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА

В методе точечного источника использовано уравнение, описывающее поглощение энергии на расстоянии  $r$  от точечного источника моноэнергетических фотонов в однородной бесконечной среде (воде):

$$\Phi(r) = \frac{\mu_{en}}{\rho} \cdot \frac{1}{4\pi r^2} \cdot \exp(-\mu r) \cdot B(\mu r) \quad (5),$$

где

$\Phi(r)$  – точечная изотропная удельная поглощенная фракция от  $r$ ;

$\mu_{en}$  – линейный коэффициент поглощения энергии;

$\mu$  – линейный коэффициент ослабления;

$\rho$  – плотность среды;

$B(\mu r)$  – фактор накопления, учитывающий вклад рассеянного излучения в поглощенную энергию [7].

Фактор накопления для точечных источников в воде может быть представлен в виде:

$$B(\mu r) \approx 1 + \exp(\alpha \mu r) \sum_{n=1}^9 a_n (\mu r)^n \quad (6),$$

где значения коэффициентов  $\alpha$  и  $a_n$  ( $n = 1, 2, \dots, 9$ ) известны для определенных энергий [26]. Для технеция с энергией 140 кэВ, взятого нами в качестве РФП, эти значения представлены в таблице 1:

$$\alpha = -0.0173$$

Таблица 1. Значения коэффициентов  $a_n$ , входящих в уравнение для фактора накопления.

$a_1 = 1.50$	$a_4 = 1.05 \cdot 10^{-2}$	$a_7 = -2.59 \cdot 10^{-6}$
$a_2 = 1.20$	$a_5 = -8.08 \cdot 10^{-4}$	$a_8 = 5.14 \cdot 10^{-8}$
$a_3 = 1.20 \cdot 10^{-1}$	$a_6 = 6.80 \cdot 10^{-5}$	$a_9 = -4.06 \cdot 10^{-10}$

Подставляя (6) в (5), получим:

$$\Phi = \frac{\mu_{en}}{\rho} \cdot \frac{1}{4\pi r^2} \cdot \exp(-\mu r) \cdot (1 + \exp(\alpha \mu r) \sum_{n=1}^9 a_n (\mu r)^n) \quad (7)$$

Учитывая, что значения фактора накопления рассчитываются для бесконечной среды, а мы имеем дело с объектами ограниченных размеров, которыми являются человек и его органы, необходимо ввести соответствующие поправки к значениям фактора накопления.

Моделируя тело и голову человека круговыми цилиндрами I и II, радиус и высота которых  $R_1, H_1$  и  $R_2, H_2$  соответственно, формулу для коэффициента, учитывающего данные поправки, можно представить следующим образом:

$$K = 1 - (K_1 + K_2 + K_3) \quad (8),$$

где

$$K_1 = \frac{R_1}{2} \cdot \int_0^{H_1} \frac{\exp(\mu \sqrt{R_1^2 + z^2})}{R_1^2 + z^2} dz \quad (9)$$

учитывает количество непрореагировавших частиц, выбывших из боковой поверхности цилиндра I, моделирующего тело человека;

$$K_2 = \frac{R_2}{2} \cdot \int_0^{H_2} \frac{\exp(\mu \sqrt{R_2^2 + z^2})}{R_2^2 + z^2} dz \quad (10)$$

учитывает количество непрореагировавших частиц, выбывших из боковой поверхности цилиндра II, моделирующего голову человека;

$$K_3 = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{R_2^2}{R_1^2}\right) \quad (11)$$

учитывает количество непровзаимодействовавших частиц, выбывших из верхнего основания цилиндра I и не попавших в цилиндр II.

Таблица 2. Параметры фантома человека.

Фантом	R <sub>1</sub>	H <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
10 лет	13.90	50.8	7.43	15.19
15 лет	17.25	63.10	7.77	15.97
взрослый	20.00	70.00	8.00	16.85

В таблице 2 представлены значения параметров круговых цилиндров, моделирующих тело и голову человека.

После подстановки (9) – (11) в (8) получим

$$K = \frac{1}{2} \left(1 - R_1 \int_0^{H_1} \frac{\exp(\mu \sqrt{R_1^2 + z^2})}{R_1^2 + z^2} dz - R_2 \int_0^{H_2} \frac{\exp(\mu \sqrt{R_2^2 + z^2})}{R_2^2 + z^2} dz + \frac{R_2^2}{R_1^2}\right). \quad (12)$$

Конечная формула для вычисления поглощенной фракции методом точечного источника имеет вид:

$$\Phi = \frac{\mu_{en}}{\rho} \cdot \frac{1}{8\pi r^2} \cdot \exp(-\mu r) \cdot \left[1 - R_1 \int_0^{H_1} \frac{\exp(\mu \sqrt{R_1^2 + z^2})}{R_1^2 + z^2} dz - R_2 \int_0^{H_2} \frac{\exp(\mu \sqrt{R_2^2 + z^2})}{R_2^2 + z^2} dz + \frac{R_2^2}{R_1^2}\right] \times \\ \times (1 + \exp(\alpha \mu r) \sum_{n=1}^9 a_n (\mu r)^n) \quad (13)$$

Все расчеты по указанным формулам производились для математической модели “усредненного человека” – фантома. В качестве точечного органа-источника мы взяли центр щитовидной железы, учитывая ее малые размеры и считая источник фотонов в ней равномерно распределенным.

Рассчитывались без учета размеров тела человека поглощенные фракции в точечных органах-мишенях по формуле (7). Затем мы вводили поправки к полученному результату с учетом ограниченных размеров тела человека, используя формулу (12).



# РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

## 1. РАСЧЕТ ФАНТОМА ЧЕЛОВЕКА

Для усредненного человека разработана математическая модель, а также созданы гетерогенные фантомы, являющиеся материальным воплощением этой модели (рис.2).

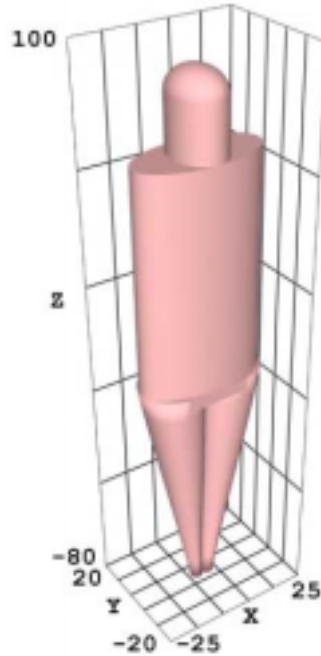


Рис 2. Фантом тела человека.

На рис.2 представлена общая модель усредненного человека.

Туловище, не включая женские молочные железы, представлено эллиптическим цилиндром:

$$\left(\frac{x}{A_T}\right)^2 + \left(\frac{y}{B_T}\right)^2 \leq 1, \\ 0 \leq z \leq C_T \quad (13).$$

Голова представлена как правильный эллиптический цилиндр, накрытый половиной эллипсоида:

$$\left(\frac{x}{A_H}\right)^2 + \left(\frac{y}{B_H}\right)^2 \leq 1, \\ C_T \leq z \leq C_T + C_{H1} \quad (14),$$

ИЛИ

$$\left(\frac{x}{A_H}\right)^2 + \left(\frac{y}{B_H}\right)^2 + \left(\frac{z - [C_T + C_{H1}]}{C_{H2}}\right)^2 \leq 1,$$

$$z > C_T + C_{H1} \quad (15).$$

Ноги представлены двумя усеченными конусами:

$$x^2 + y^2 \leq \pm x \left( A_T + \frac{A_T}{C'_L} z \right) \quad (16),$$

$$-C_L \leq z \leq 0.$$

В формуле (16) знак «-» берется для правой ноги, а «+» – для левой.

Таблица 3 Параметры фантома человека.

Фантом	$A_T$	$B_T$	$C_T$	$A_H$	$B_H$	$C_{H1}$	$C_{H2}$	$C_L$	$C'_L$
10 лет	13.90	8.40	50.80	7.43	9.40	15.19	6.59	66.0	90.0
15 лет	17.25	9.80	63.10	7.77	9.76	15.97	6.92	78.0	100.0
Взрослый	20.00	10.00	70.00	8.00	10.00	16.85	7.15	80.0	100.0

## 2. РАСЧЕТ ФАНТОМА СКЕЛЕТА ЧЕЛОВЕКА

Скелет человека и его модель представлены на рис.3.

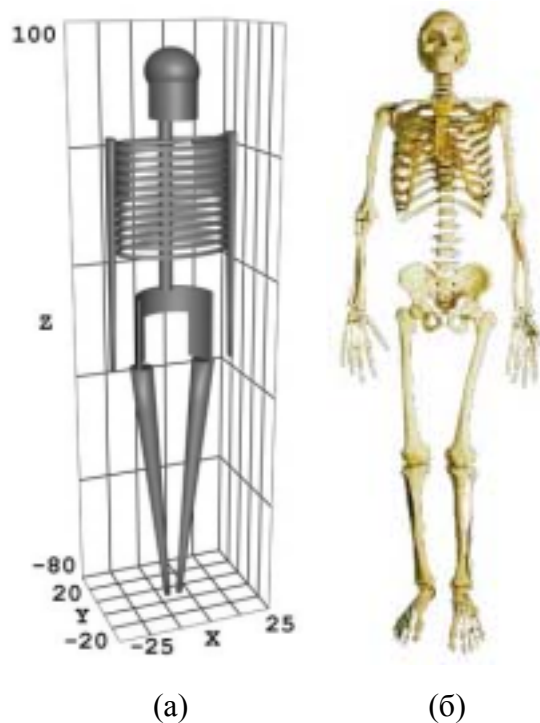


Рис.3. Скелет человека и его модель.

Скелет включают в себя кости ног, кости рук, таз, позвоночник, череп, грудную клетку, ключицы, лопатки.

Рассмотрим модель и аналитическое выражение грудной клетки<sup>2</sup>.

**Грудная клетка.** Грудная клетка представлена объемом между двумя концентрическими, вертикальными, эллиптическими цилиндрами, разрезанными эквидистантными горизонтальными плоскостями:

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 \leq 1,$$

$$\left(\frac{x}{a-d}\right)^2 + \left(\frac{y}{b-d}\right)^2 \geq 1,$$

$$z_1 \leq z \leq z_2 \quad (17),$$

$$0 \leq \frac{z-z_1}{c} < 1 \text{ или } 2 \leq \frac{z-z_1}{c} \leq 3 \quad . \quad . \quad . \quad 24 \leq \frac{z-z_1}{c} \leq 25 \quad (18).$$

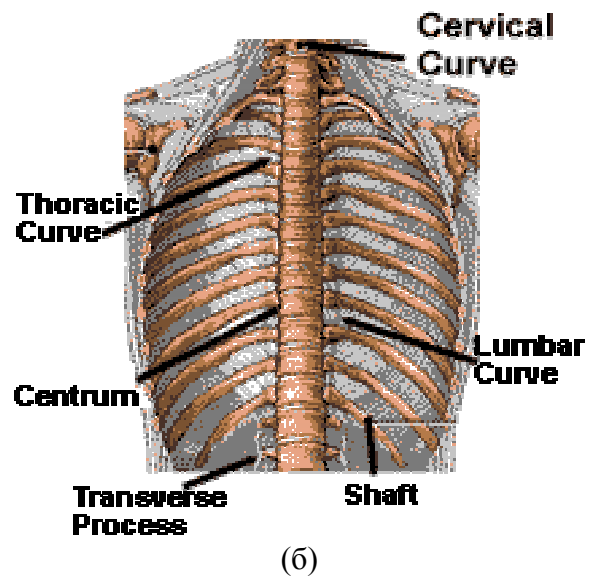
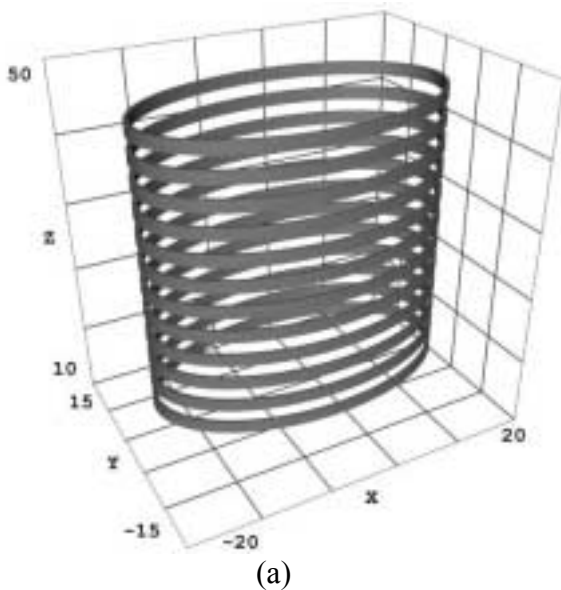


Рис. 4. Грудная клетка: модель (а), реальный орган (б).

Таблица 4. Параметры грудной клетки.

Фантом	a	b	d	z <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>	c
10 лет	11.82	8.23	0.38	25.43	48.89	1.02
15 лет	14.66	9.60	0.47	32.57	60.65	1.26
взрослый	17.00	9.80	0.50	35.10	67.30	1.40

### 3. РАСЧЕТ ФАНТОМА ВНУТРЕННИХ ОРГАНОВ

Фантом тела человека, содержащий его внутренние органы, представлен на рис.5.

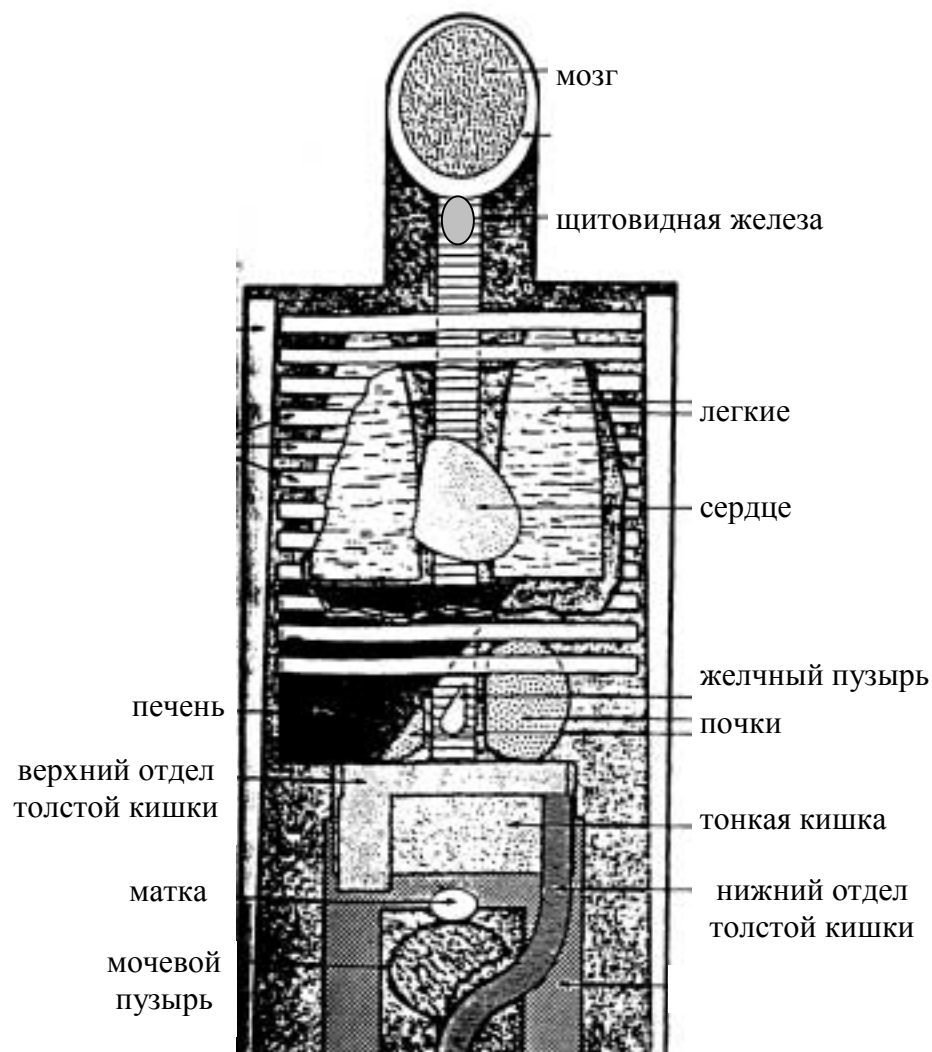


Рис.5 Фантом тела человека, содержащего внутренние органы.

В настоящей работе получены математические модели девятнадцати внутренних органов человека.

В качестве примера представим модель и аналитическое выражение надпочечников в качестве “органа-мишени”<sup>3</sup> [7, 21 - 23].

**Надпочечники.** Каждый надпочечник, представленный верхней половиной эллипсоида, изображающего почку, определяется как

<sup>2</sup> Остальные органы даны в приложении.

<sup>3</sup> Все остальные “органы-мишени” даны в приложении.

$$\left(\frac{x_1}{a}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{b}\right)^2 + \left(\frac{z_1}{c}\right)^2 \leq 1 \text{ и } z_1 \geq 0 \quad (19),$$

где  $(x_1, y_1, z_1)$  – координаты надпочечников в системе, связанной с системой координат фантома следующими уравнениями в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Theta & \sin \Theta & 0 \\ -\sin \Theta & \cos \Theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Здесь  $(x_0, y_0, z_0)$  – координаты центра надпочечников в системе координат, связанной с фантомом;

$(x, y, z)$  – координаты надпочечников в этой же системе;

$\Theta$  – угол поворота плоскости  $(xoy)$  системы относительно оси  $z$ .

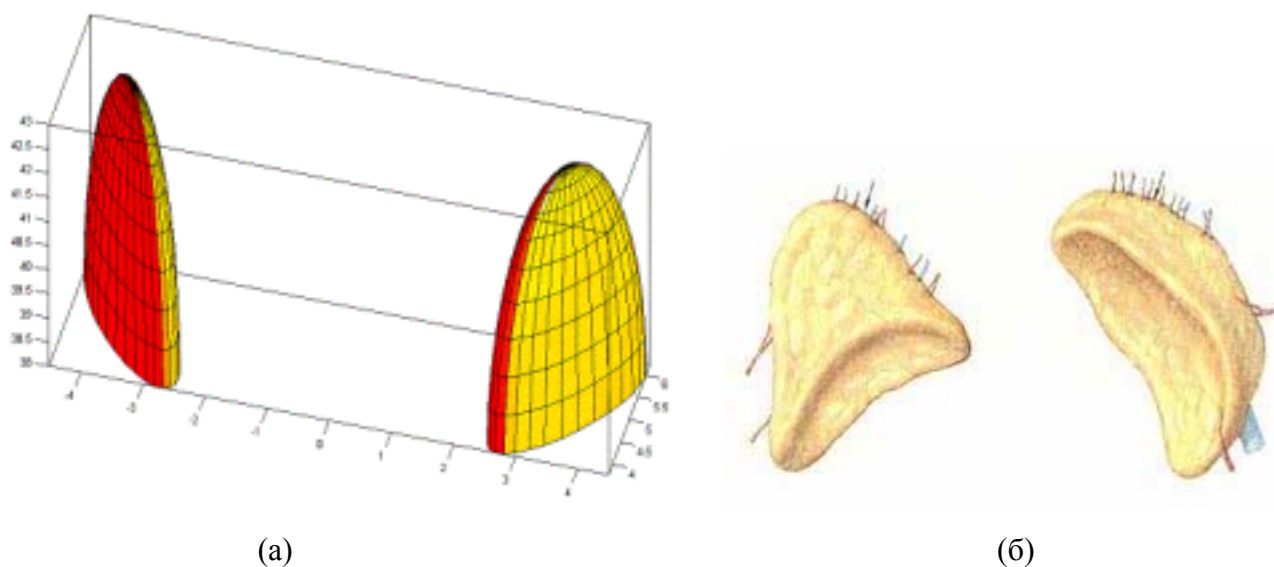


Рис.6. Надпочечники: модель (а), реальный орган (б).

Таблица 5. Параметры для надпочечников.

Фантом	a	b	c	$x_0$	$y_0$	$z_0$	$\theta$
10 лет	1.17	0.39	3.63	$\pm 2.43$	4.20	27.58	$\pm 57.2$
15 лет	1.30	0.43	4.30	$\pm 3.02$	4.90	34.26	$\pm 55.6$
взрослый	1.50	0.50	5.00	$\pm 3.50$	5.00	38.00	$\pm 52.0$

В приведенной таблице 5 значения параметров  $x_0$  и  $\theta$  берутся положительными для левого и отрицательными для правого надпочечника соответственно.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ.

В настоящей работе были получены математические модели человека в целом, костей его скелета и девятнадцати его внутренних органов. Эти модели сравниваются с реальными органами [21 - 23]. Параметры моделей органов меняются для людей различных возрастов [7, 20].

Результаты расчетов поглощенных фракций для внутренних органов человека (для десятилетних, пятнадцатилетних и взрослых людей), выполненных по схеме MIRD [3,4] и рассчитанных нами методом точечного источника по формуле (13)

$$\Phi = \frac{\mu_{en}}{\rho} \cdot \frac{1}{8\pi r^2} \cdot \exp(-\mu r) \cdot \left[ 1 - R_1 \int_0^{H_1} \frac{\exp(\mu \sqrt{R_1^2 + z^2})}{R_1^2 + z^2} dz - R_2 \int_0^{H_2} \frac{\exp(\mu \sqrt{R_2^2 + z^2})}{R_2^2 + z^2} dz + \frac{R_2^2}{R_1^2} \right] \times \\ \times (1 + \exp(\alpha \mu r) \sum_{n=1}^9 a_n (\mu r)^n),$$

представлены в таблицах 6 – 8.

В качестве органа-источника в настоящей работе рассматривалась щитовидная железа. Доза от нее в других органах человека (в органах-мишенях) приведена в таблицах 6 – 8 для энергии фотонов 140кэВ – линии фотонного излучения радионуклида Тс-99m.

Сравнение данных результатов свидетельствует о том, что метод точечного источника позволяет рассчитывать значение поглощенной дозы в различных органах в пределах погрешности 20% для пациентов любого возраста, размеров и строения тела.

Как видно из таблиц 6 – 8 для фантома десятилетнего человека погрешности расчетов поглощенных фракций для большинства органов несколько больше (в 1.4 раза), чем для фантомов взрослого и пятнадцатилетнего человека. Это можно объяснить тем, что расстояния между органами у детей значительно меньше, чем у взрослых. Поэтому неопределенность в абсолютном значении взаимного расположения органов вносит большую погрешность в результаты расчетов.

Таблица 6. Значения поглощенных фракций для фантома взрослого человека [кг<sup>-1</sup>].

<b>Орган</b>	<b>Фракция (MIRD)</b>	<b>Фракция (точечн. источник)</b>	<b>Расхождение методов (%)</b>
<b>Надпочечники</b>	$4.04 \cdot 10^{-7}$	$3.46 \cdot 10^{-7}$	<b>14</b>
<b>Мозг</b>	$6.74 \cdot 10^{-6}$	$6.16 \cdot 10^{-6}$	<b>9</b>
<b>Грудная железа</b>	$1.50 \cdot 10^{-6}$	$1.72 \cdot 10^{-6}$	<b>15</b>
<b>Стенки желч. пузыря</b>	$1.31 \cdot 10^{-7}$	$1.28 \cdot 10^{-7}$	<b>2</b>
<b>Стенки н.о. толст.к-ки</b>	$1.02 \cdot 10^{-8}$	$8.36 \cdot 10^{-9}$	<b>18</b>
<b>Стенки тонкой кишки</b>	$2.42 \cdot 10^{-8}$	$2.83 \cdot 10^{-8}$	<b>17</b>
<b>Стенки желудка</b>	$1.84 \cdot 10^{-7}$	$1.92 \cdot 10^{-7}$	<b>4</b>
<b>Стенки в.о. толст. к-ки</b>	$3.81 \cdot 10^{-8}$	$3.62 \cdot 10^{-8}$	<b>5</b>
<b>Стенки сердца</b>	$2.16 \cdot 10^{-6}$	$2.01 \cdot 10^{-6}$	<b>7</b>
<b>Почки</b>	$1.46 \cdot 10^{-7}$	$1.24 \cdot 10^{-7}$	<b>15</b>
<b>Печень</b>	$4.29 \cdot 10^{-7}$	$4.00 \cdot 10^{-7}$	<b>7</b>
<b>Легкие</b>	$4.40 \cdot 10^{-6}$	$4.53 \cdot 10^{-6}$	<b>3</b>
<b>Яичники</b>	$1.13 \cdot 10^{-8}$	$1.13 \cdot 10^{-8}$	<b>1</b>
<b>Поджелудочная железа</b>	$3.61 \cdot 10^{-7}$	$3.13 \cdot 10^{-7}$	<b>13</b>
<b>Селезенка</b>	$3.90 \cdot 10^{-7}$	$3.22 \cdot 10^{-7}$	<b>17</b>
<b>Семенники</b>	$1.14 \cdot 10^{-9}$	$1.01 \cdot 10^{-9}$	<b>11</b>
<b>Вилочковая железа</b>	$8.10 \cdot 10^{-6}$	$7.41 \cdot 10^{-6}$	<b>9</b>
<b>Стенки моч. пузыря</b>	$4.74 \cdot 10^{-9}$	$4.45 \cdot 10^{-9}$	<b>6</b>
<b>Матка</b>	$1.06 \cdot 10^{-8}$	$1.04 \cdot 10^{-8}$	<b>2</b>

Таблица 7. Значения поглощенных фракций для фантома пятнадцатилетнего подростка<sup>4</sup> [кг<sup>-1</sup>].

<b>Орган</b>	<b>Фракция (MIRD)</b>	<b>Фракция (точечн. источник)</b>	<b>Расхождение методов (%)</b>
<b>Надпочечники</b>	$5.48 \cdot 10^{-7}$	$5.40 \cdot 10^{-7}$	<b>1</b>
<b>Мозг</b>	$7.12 \cdot 10^{-6}$	$6.56 \cdot 10^{-6}$	<b>8</b>
<b>Грудная железа</b>	$2.00 \cdot 10^{-6}$	$2.33 \cdot 10^{-6}$	<b>17</b>
<b>Стенки желчн. пузыря</b>	$2.42 \cdot 10^{-7}$	$2.30 \cdot 10^{-7}$	<b>5</b>
<b>Стенки н.о. толст. к-ки</b>	$2.21 \cdot 10^{-8}$	$1.80 \cdot 10^{-8}$	<b>19</b>
<b>Стенки тонкой кишки</b>	$6.75 \cdot 10^{-8}$	$6.14 \cdot 10^{-8}$	<b>9</b>
<b>Стенки желудка</b>	$3.60 \cdot 10^{-7}$	$3.32 \cdot 10^{-7}$	<b>8</b>
<b>Стенки в.о. толст. к-ки</b>	$7.64 \cdot 10^{-8}$	$7.24 \cdot 10^{-8}$	<b>5</b>
<b>Стенки сердца</b>	$2.66 \cdot 10^{-6}$	$2.33 \cdot 10^{-6}$	<b>12</b>
<b>Почки</b>	$2.48 \cdot 10^{-7}$	$1.99 \cdot 10^{-7}$	<b>20</b>
<b>Печень</b>	$6.99 \cdot 10^{-7}$	$6.25 \cdot 10^{-7}$	<b>11</b>
<b>Легкие</b>	$5.87 \cdot 10^{-6}$	$6.55 \cdot 10^{-6}$	<b>12</b>
<b>Яичники</b>	$2.60 \cdot 10^{-8}$	$2.52 \cdot 10^{-8}$	<b>3</b>
<b>Поджелуд. железа</b>	$4.51 \cdot 10^{-7}$	$4.74 \cdot 10^{-7}$	<b>5</b>
<b>Селезенка</b>	$6.52 \cdot 10^{-7}$	$5.33 \cdot 10^{-7}$	<b>18</b>
<b>Семенники</b>	$3.34 \cdot 10^{-9}$	$3.02 \cdot 10^{-9}$	<b>10</b>
<b>Вилочковая железа</b>	$1.38 \cdot 10^{-5}$	$1.14 \cdot 10^{-5}$	<b>17</b>
<b>Стенки моч. пузыря</b>	$1.18 \cdot 10^{-8}$	$1.09 \cdot 10^{-8}$	<b>8</b>
<b>Матка</b>	$2.38 \cdot 10^{-8}$	$2.33 \cdot 10^{-8}$	<b>2</b>

<sup>4</sup> Эти значения часто используются для женщин.



Таблица 8. Значения поглощенных фракций для фантома десятилетнего ребенка [кг<sup>-1</sup>].

<b>Орган</b>	<b>Фракция (MIRD)</b>	<b>Фракция (точечн. источник)</b>	<b>Расхождение методов (%)</b>
<b>Надпочечники</b>	$1.40 \cdot 10^{-6}$	$1.14 \cdot 10^{-6}$	<b>19</b>
<b>Мозг</b>	$8.20 \cdot 10^{-6}$	$6.57 \cdot 10^{-6}$	<b>20</b>
<b>Грудная железа</b>	$5.12 \cdot 10^{-6}$	$4.37 \cdot 10^{-6}$	<b>15</b>
<b>Стенки желчн. пузыря</b>	$7.24 \cdot 10^{-7}$	$6.04 \cdot 10^{-7}$	<b>17</b>
<b>Стенки н.о. толст. к-ки</b>	$9.11 \cdot 10^{-8}$	$7.78 \cdot 10^{-8}$	<b>15</b>
<b>Стенки тонкой кишки</b>	$2.16 \cdot 10^{-7}$	$1.96 \cdot 10^{-7}$	<b>9</b>
<b>Стенки желудка</b>	$8.50 \cdot 10^{-7}$	$7.81 \cdot 10^{-7}$	<b>8</b>
<b>Стенки в.о. толст. к-ки</b>	$2.58 \cdot 10^{-7}$	$2.24 \cdot 10^{-7}$	<b>13</b>
<b>Стенки сердца</b>	$5.62 \cdot 10^{-6}$	$4.84 \cdot 10^{-6}$	<b>14</b>
<b>Почки</b>	$6.52 \cdot 10^{-7}$	$5.19 \cdot 10^{-7}$	<b>20</b>
<b>Печень</b>	$1.46 \cdot 10^{-6}$	$1.23 \cdot 10^{-6}$	<b>16</b>
<b>Легкие</b>	$1.04 \cdot 10^{-5}$	$1.10 \cdot 10^{-5}$	<b>6</b>
<b>Яичники</b>	$1.06 \cdot 10^{-7}$	$9.47 \cdot 10^{-8}$	<b>11</b>
<b>Поджелуд. железа</b>	$1.26 \cdot 10^{-6}$	$1.03 \cdot 10^{-6}$	<b>18</b>
<b>Селезенка</b>	$1.32 \cdot 10^{-6}$	$1.09 \cdot 10^{-6}$	<b>17</b>
<b>Семенники</b>	$2.16 \cdot 10^{-8}$	$1.85 \cdot 10^{-8}$	<b>14</b>
<b>Вилочковая железа</b>	$2.74 \cdot 10^{-5}$	$2.32 \cdot 10^{-5}$	<b>15</b>
<b>Стенки моч. пузыря</b>	$5.52 \cdot 10^{-8}$	$4.84 \cdot 10^{-8}$	<b>12</b>
<b>Матка</b>	$9.93 \cdot 10^{-8}$	$8.94 \cdot 10^{-8}$	<b>10</b>

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа является составной частью создания компьютерного фантома человека, включающего в себя модели скелета, внутренних органов и их химического состава<sup>5</sup>. Эта модель может быть усовершенствована в дальнейшем путем детализации структуры внутренних органов и математического моделирования других структур человека.

Используя метод точечного источника, можно рассчитать и предсказать значение поглощенных доз излучений радиофармпрепаратов, вводимых внутрь организма, во всех органах с погрешностью не более 20% независимо от возраста, размеров и конституции тела каждого отдельного пациента.

Расчеты поглощенных доз по методу MIRD с использованием значений поглощенных фракций из-за значительных анатомических отклонений пациентов от “стандартного человека” и, как следствие этого, значительных отклонений доз облучения от рассчитанных этим методом могут быть использованы только в гигиенической дозиметрии.

Анализ полученных результатов показывает, что после своего усовершенствования метод точечного источника может быть применен в лучевой терапии инкорпорированными радионуклидами. Совершенствование настоящего метода включает в себя как наиболее детальный расчет поправок в факторам накопления, так и учет объемных распределений доз излучения в органах, наличия неоднородностей в теле человека и влияния границ раздела сред.

Работа может быть применена для расчетов в области лучевой терапии и ядерной медицины, для расчета защиты человека от оружия массового поражения и в результате аварий на АЭС и других ядерных объектов.

---

<sup>5</sup> См. приложение.

# ПРИЛОЖЕНИЕ

## 1. СКЕЛЕТ ЧЕЛОВЕКА

**Кости ног.** Кости каждой ноги человека представлены усеченным конусом. В неравенстве (21) знак «-» берется для левой ноги и «+» для правой ноги соответственно:

$$\left( x \pm \left[ \frac{A_T}{2} + \frac{kz}{C_L - S} \right] \right)^2 + y^2 \leq \left( R_1 + \left[ \frac{R_1 - R_2}{C_L - S} \right] z \right)^2, \quad (21)$$

$$-(C_L - S) \leq z \leq 0,$$

где

$$k = \frac{A_T}{2} \left( 1 - \frac{C'_L - C_L}{C'_L} \right), \quad (22)$$

$$R_1 = 0.175 A_T, \quad (23)$$

$$R_2 = \frac{A_T}{4} \left( \frac{C'_L - C_L}{C'_L} \right). \quad (24)$$

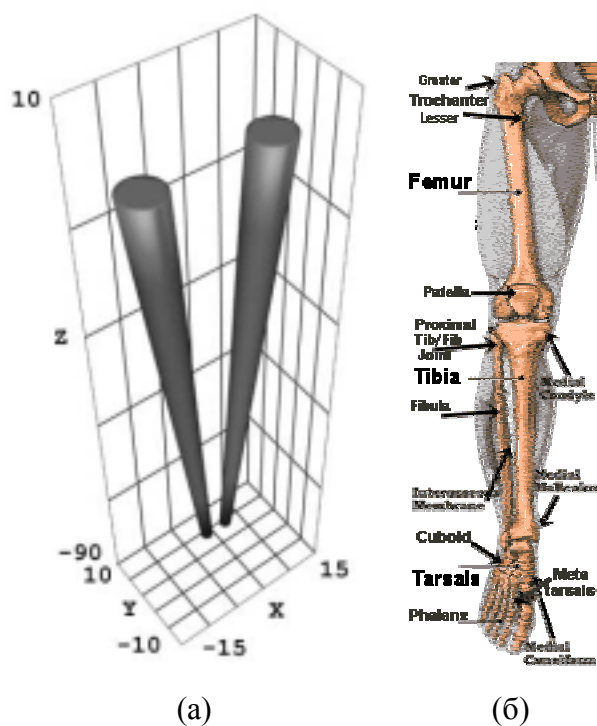


Рис 7. Кости ног человека: модель (а), реальный орган (б)

Таблица 9. Параметры для модели костей ног.

Фантом	$A_T$	$C_L$	$C'_L$	S
10 лет	13.90	66.0	90.0	0.10
15 лет	17.25	78.0	100.0	0.17
взрослый	20.00	80.0	100.0	0.20

**Кости рук.** Кости каждой руки представлены усеченным конусом:

$$\left[ \frac{\left[ \frac{a}{2z_2} \right] (z - z_2) + (x - x_0)}{a} \right]^2 + \left[ \frac{y}{b} \right]^2 \leq \left[ \frac{2z_2 + (z - z_2)}{2z_2} \right]^2, \quad (25)$$

$$0 \leq z \leq z_2.$$

В таблице 10 положительные значения  $x_0$  соответствуют левой кости руки, а отрицательные – правой.

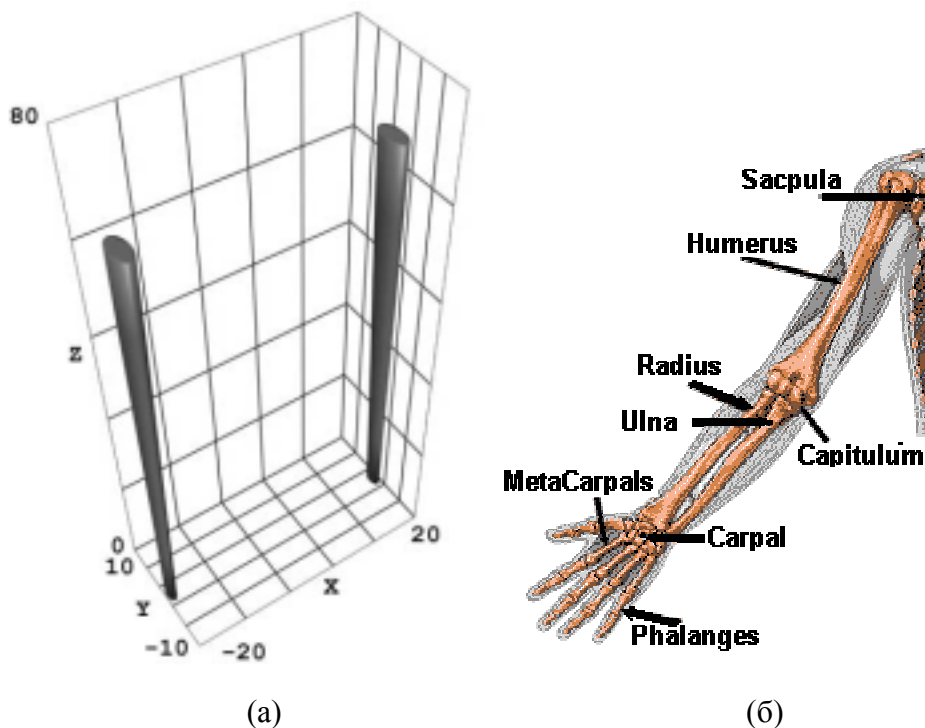


Рис 8. Кости рук человека: модель(а), реальный орган (б).

Таблица 10. Параметры для модели костей рук.

ФАНТОМ	a	b	x <sub>0</sub>	z <sub>2</sub>
10 лет	0.97	2.27	±12.79	50.07
15 лет	1.21	2.65	±15.87	62.20
взрослый	1.40	2.70	±18.40	69.00

**Таз.** Кости таза занимают часть объема между двумя не коаксиальными эллиптическими цилиндрами:

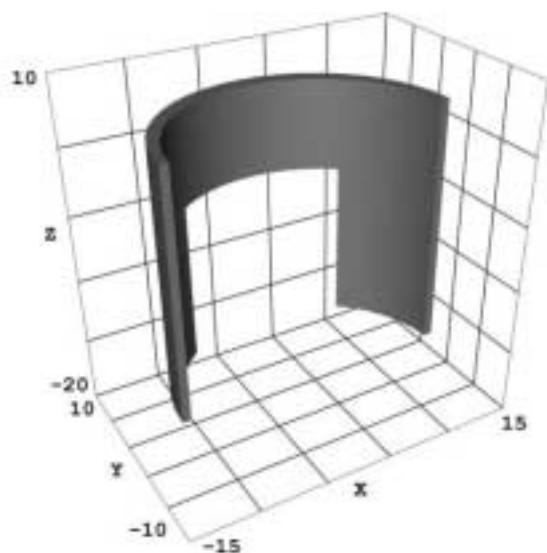
$$\left(\frac{x}{a_2}\right)^2 + \left(\frac{y-y_{02}}{b_2}\right)^2 \leq 1,$$

$$\left(\frac{x}{a_1}\right)^2 + \left(\frac{y-y_{01}}{b_1}\right)^2 \geq 1,$$

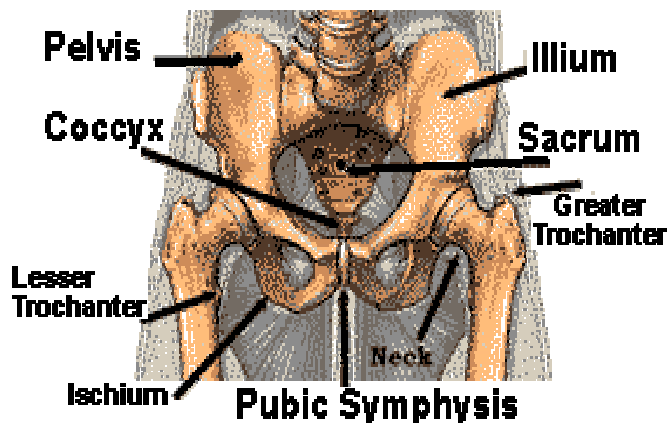
$$0 \leq z \leq z_2, \quad (26)$$

$$y \geq y_{02},$$

$$y \leq y_1 \text{ если } z \leq z_1. \quad (27)$$



(a)



(б)

Рис. 9. Кости таза: модель (а), реальный орган (б).

Таблица 11. Параметры для модели костей таза.

ФАНТОМ	a <sub>1</sub>	b <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	b <sub>2</sub>	y <sub>01</sub>	y <sub>02</sub>	y <sub>1</sub>	z <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>
10 лет	7.85	9.49	8.34	10.08	-3.19	-2.52	4.20	10.16	15.97
15 лет	9.75	11.07	10.35	11.76	-3.72	-2.94	4.90	12.62	19.83
взрослый	11.30	11.30	12.00	12.00	-3.80	-3.00	5.00	14.00	22.00

**Позвоночник.** Позвоночник представлен эллиптическим цилиндром:

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b}\right)^2 \leq 1, \quad z_1 \leq z \leq z_4. \quad (28)$$

Он разделен на три части – верхнюю  $z_3 \leq z \leq z_4$ , среднюю  $z_2 \leq z \leq z_3$ , и нижнюю  $z_1 \leq z \leq z_2$  – для удобства расчета поглощенных фракций.

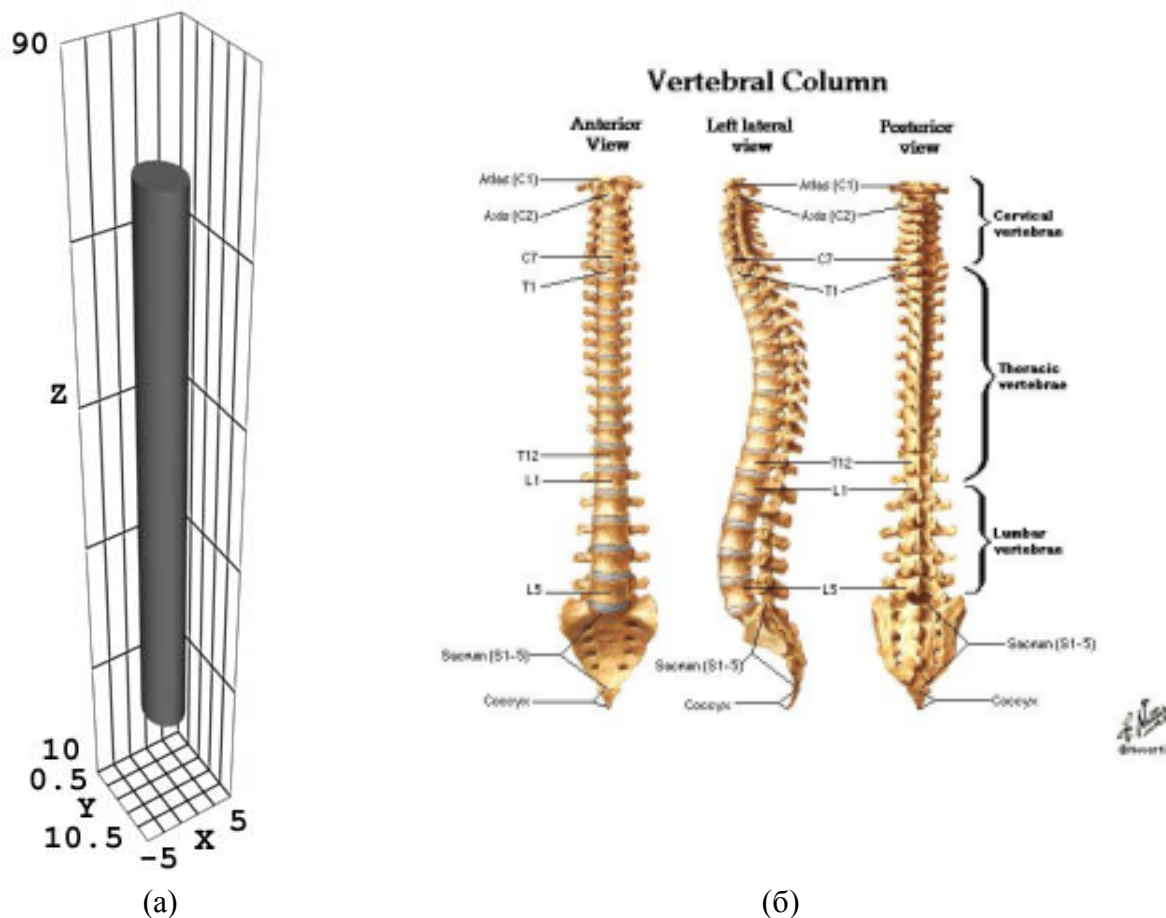


Рис 10. Позвоночник: модель (а), реальный орган (б).

Таблица 12. Параметры для позвоночника.

Фантом	a	b	$y_0$	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$
10 лет	1.39	2.10	4.62	15.97	25.47	50.80	59.89
15 лет	1.73	2.45	5.39	19.83	31.64	63.10	72.91
взрослый	2.00	2.50	5.50	22.00	35.10	70.00	80.54

**Череп.** Череп состоит из лицевой и мозговой части. Мозговая часть представлена объемом между двумя concentрическими эллипсоидами:

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z - [C_T + C_{H1}]}{c}\right)^2 \geq 1, \quad (29)$$

$$\left(\frac{x}{a+d}\right)^2 + \left(\frac{y}{b+d}\right)^2 + \left(\frac{z - [C_T + C_{H1}]}{c+d}\right)^2 \leq 1. \quad (30)$$

Таблица 13. Параметры для мозговой части черепа.

Фантом	a	b	c	C <sub>T</sub>	C <sub>H1</sub>	d
10 лет	6.51	8.48	5.67	50.80	15.19	0.67
15 лет	6.58	8.57	5.73	63.10	15.97	0.76
взрослый	6.60	8.60	5.75	70.00	16.85	0.90

Лицевая часть представлена частью объема между двумя коаксиальными эллиптическими цилиндрами. Часть объема, перекрывающаяся с мозговой частью и мозгом, исключена:

$$\left(\frac{x}{a_1}\right)^2 + \left(\frac{y}{b_1}\right)^2 \leq 1,$$

$$\left(\frac{x}{a_1 - d}\right)^2 + \left(\frac{y}{b_1 - d}\right)^2 \geq 1,$$

$$y \leq 0,$$

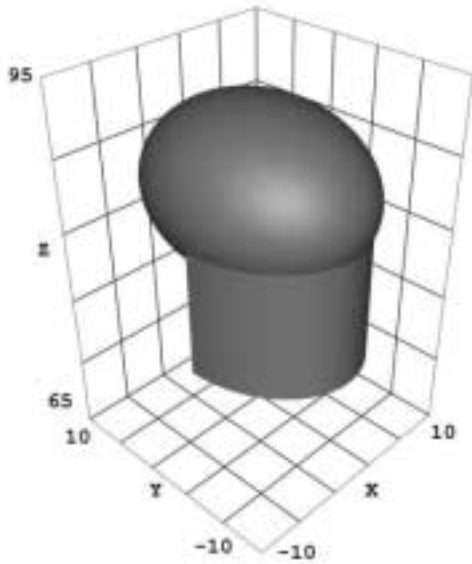
$$C_T + z_1 \leq z \leq C_T + z_2, \quad (31)$$

$$\left(\frac{x}{a_2}\right)^2 + \left(\frac{y}{b_2}\right)^2 + \left(\frac{z - [C_T + C_{H1}]}{c_2}\right)^2 > 1.^6 \quad (32)$$

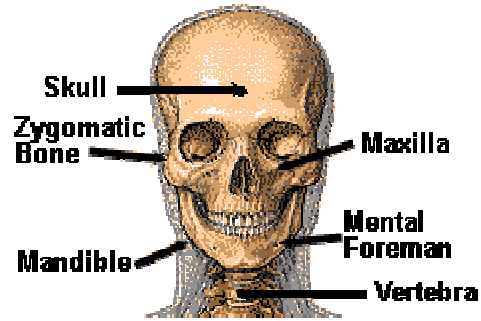
Таблица 14. Параметры для лицевой части черепа.

Фантом	a <sub>1</sub>	b <sub>1</sub>	d	C <sub>T</sub>	C <sub>H1</sub>	z <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>	a <sub>2</sub>	b <sub>2</sub>	c <sub>2</sub>
10 лет	6.93	8.90	0.74	50.80	15.19	3.61	13.73	7.18	9.15	6.34
15 лет	6.92	8.91	1.10	63.10	15.97	3.79	14.05	7.34	9.33	6.49
взрослый	7.00	9.00	1.40	70.00	16.85	4.00	14.73	7.50	9.50	6.65

<sup>6</sup> a<sub>2</sub> = a + d, b<sub>2</sub> = b + d, c<sub>2</sub> = c + d, где значения a, b, d соответствуют мозговой части черепа и берутся из таблицы 13.



(a)



(б)

Рис 11. Череп: модель(а), реальный орган (б).

**Ключицы.** Ключицы представлены секциями тора малого радиуса  $r$ , который лежит вдоль окружности  $x^2 + (y - y_0)^2 = R^2$ ,  $z = z_1$ . Ключицы включают в себя только часть тора, лежащую между плоскостями  $y_0 - y = |x|ctg\theta_1$ , и  $y_0 - y = |x|ctg\theta_2$ . Эти уравнения могут быть приведены к форме

$$(z - z_1)^2 + \left( R - \sqrt{x^2 + (y - y_0)^2} \right)^2 \leq r^2, \quad (35)$$

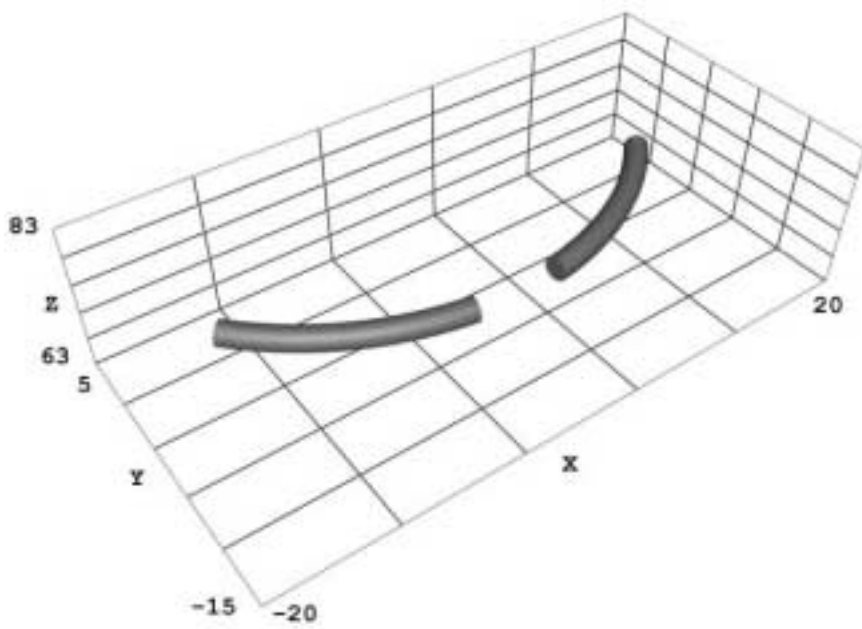
$$ctg\theta_1 \leq \frac{y_0 - y}{|x|} \leq ctg\theta_2, \quad (36)$$

$$y < 0$$

Таблица 15. Параметры для ключицы.

Фантом	$y_0$	$z_1$	R	r	$ctg \Theta_1$	$ctg \Theta_2$
10 лет	4.93	49.53	12.40	0.5981	6.2581	0.65708
15 лет	7.22	61.52	15.93	0.7274	6.4852	0.73137
взрослый	11.10	68.25	20.00	0.7883	7.0342	0.89415





(а)



(б)

Рис 12. Ключица: модель (а), реальный орган (б).

**Лопатки.** Лопатки определены как часть объема между двумя коаксиальными эллиптическими цилиндрами. Для каждой лопатки объем заключен между плоскостями  $z = z_1$ ,  $z = z_2$ ,  $y = m_1|x|$ ,  $y = m_2|x|$ .

$$\left(\frac{x}{a_2}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 \leq 1,$$

$$\left(\frac{x}{a_1}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 > 1,$$

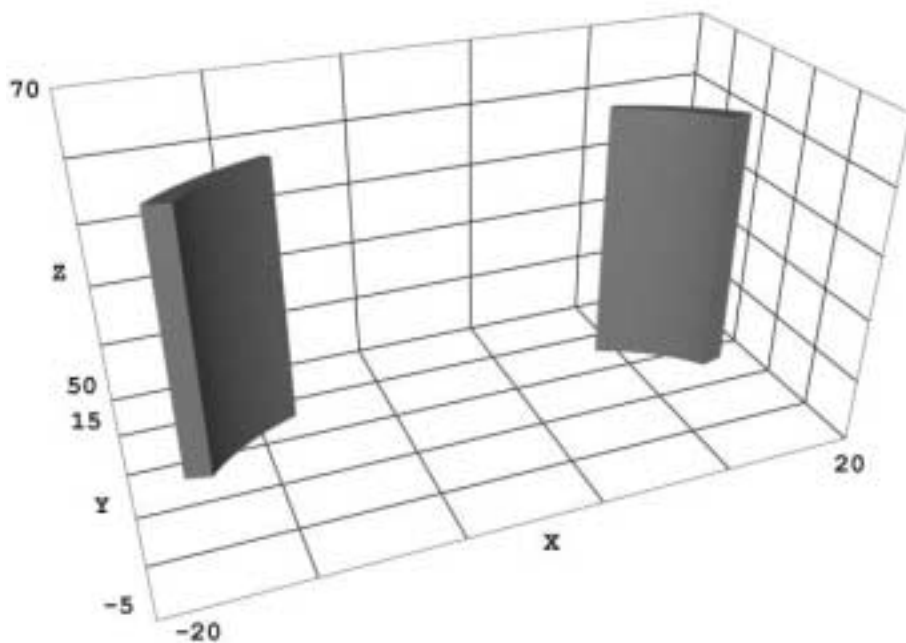
$$z_1 \leq z \leq z_2, \quad (37)$$

$$y > 0,$$

$$m_1 < \frac{y}{|x|} < m_2. \quad (38)$$

Таблица 16. Параметры для ключицы.

Фантом	$a_1$	$a_2$	$b$	$z_1$	$z_2$	$m_1$	$m_2$
10 лет	11.82	13.20	8.23	36.94	48.84	0.30	0.97
15 лет	14.66	16.36	9.60	45.88	60.67	0.28	0.91
взрослый	17.00	19.00	9.80	50.90	67.30	0.25	0.80



(a)



(б)

Рис 13. Лопатки: модель (а), реальный орган (б).

Таблица 17. Масса органов системы скелета человека (г). Относительная погрешность от 2 до 5%.

<b>Орган</b>	<b>10 лет</b>	<b>15 лет</b>	<b>взрослый</b>
Кости ног (верхний отдел)	440	792	1090
Кости ног (средний отдел)	667	1180	1590
Кости ног (нижний отдел)	638	969	1240
Кости рук (верхний отдел)	213	386	505
Кости рук (средний отдел)	160	290	379
Кости рук (нижний отдел)	192	347	454
Кости таза	361	645	849
Позвоночник (верхний отдел)	117	183	232
Позвоночник (средний отдел)	325	586	767
Позвоночник (нижний отдел)	122	220	288
Череп (мозговой отдел)	607	712	865
Череп (лицевой отдел)	226	327	427
Грудная клетка	413	744	972
Ключицы	32.4	58.3	76.5
Лопатки	120	216	283

## 2. ВНУТРЕННИЕ ОРГАНЫ ЧЕЛОВЕКА.

**Мозг.** Мозг представлен эллипсоидом

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z - [C_T + C_{H1}]}{c}\right)^2 \leq 1 \quad (39).$$

$C_T$  – высота цилиндра, моделирующего тело человека;

$C_{H1}$  – высота цилиндра, моделирующего голову человека.

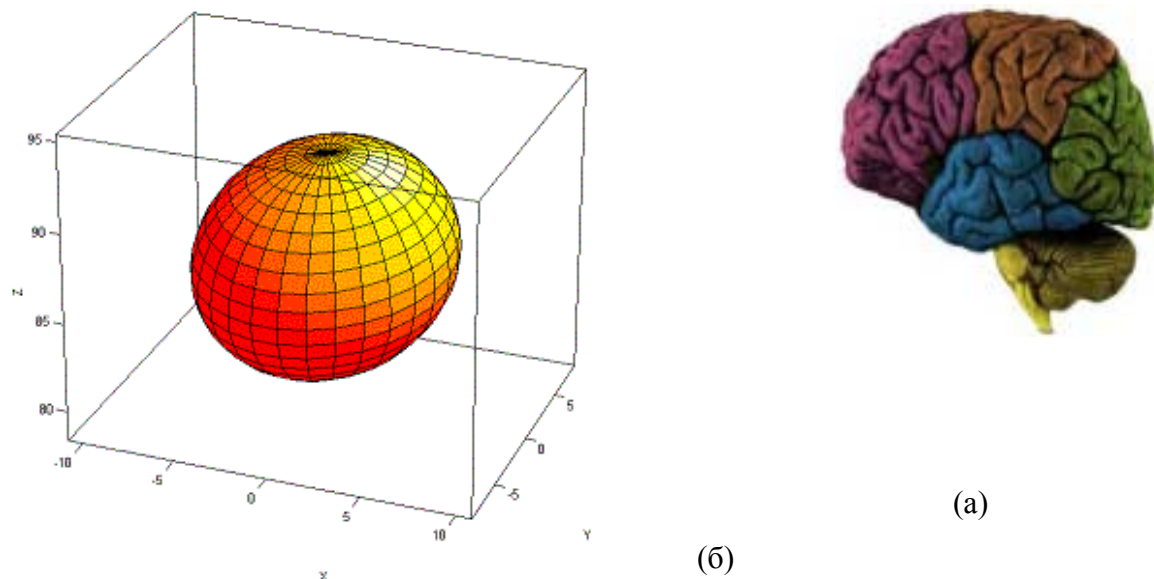


Рис. 14. Мозг: модель (а), реальный орган (б).

Таблица 18. Параметры для мозга.

ФАНТОМ	a	b	c	$C_T$	$C_{H1}$
10 лет	6.51	8.48	5.67	50.80	15.19
15 лет	6.58	8.57	5.73	63.10	15.97
взрослый	6.60	8.60	5.75	70.00	16.85

**Грудная железа.** Грудная железа представлена частями двух эллипсоидов, примыкающих к цилиндру, моделирующему тело человека:

$$\left(\frac{x - x_0}{a}\right)^2 + \left(\frac{y - y_0}{b}\right)^2 + \left(\frac{z - z_0}{c}\right)^2 \leq 1 \quad (40)$$

$$\text{и} \quad \left(\frac{x}{A_T}\right)^2 + \left(\frac{y}{B_T}\right)^2 > 1 \quad (41),$$

$$\text{где } y_0 = -B_T \sqrt{1 - \left(\frac{x_0}{A_T}\right)^2}.$$

$A_r, B_r$  – полуоси эллипса, являющегося основанием цилиндра, моделирующего тело человека.

$(x_0, y_0, z_0)$  – координаты центра рассматриваемого органа.

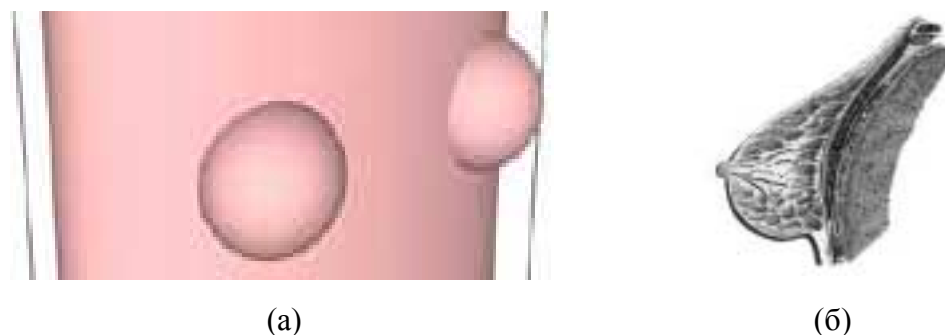


Рис. 15. Грудная железа: модель (а), реальный орган (б).

В случае, когда рассматривается слой кожи толщиной  $S$  как отдельный орган, то грудная железа, исключая кожу, представляется в виде:

$$\left(\frac{x-x_0}{a-S}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b-S}\right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{c-S}\right)^2 \leq 1 \quad (42)$$

$$\text{и } \left(\frac{x}{A_r}\right)^2 + \left(\frac{y}{B_r}\right)^2 > 1 \quad (43).$$

Таблица 19. Параметры для грудной железы.

Фантом	a	b	c	$x_0$	$z_0$	S	$A_r$	$B_r$
10 лет	0.94	0.94	0.94	$\pm 6.95$	37.73	0.10	13.90	8.40
15-АF	4.95	4.35	4.15	$\pm 8.63$	46.87	0.17	17.25	9.80
АМ	4.95	4.35	4.15	$\pm 10.00$	52.00	0.20	20.00	10.00

Положительные значения  $x_0$  в представленной таблице 19 берутся для левой железы, а отрицательные – для правой.

**Желчный пузырь.** Желчный пузырь представлен усеченным конусом с примыкающей к нему полусферой. Желчный пузырь – полый орган.

Уравнения даны в системе координат  $(x_1, y_1, z_1)$ , связанной с координатами  $(x, y, z)$  фантома следующим соотношением:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} \quad (44).$$

$(x_0, y_0, z_0)$  – координаты центра рассматриваемого органа.

$\begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 \end{bmatrix}$  - матрица перехода от одной системы координат к другой.

Стенки описываются следующим образом:

(полусферическая часть)

$$\begin{aligned} r_1 \leq x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 \leq r_2^2, \\ z_1 < 0; \end{aligned} \quad (45)$$

$r_1, r_2$  – радиусы внутренней и внешней полусфер соответственно, моделирующих часть стенки органа;

(коническая часть)

$$\begin{aligned} (r_1 - sz_1)^2 x_1^2 + y_1^2 \leq (r_2 - sz_1)^2, \\ 0 \leq z_1 \leq h \end{aligned} \quad (46).$$

$h$  – высота конуса;

$s$  – коэффициент, отражающий изменение с высотой внутреннего и внешнего конусов по отношению к  $r_1$  и  $r_2$  соответственно радиусов окружностей, являющихся сечениями конусов плоскостью, параллельной их основанию.

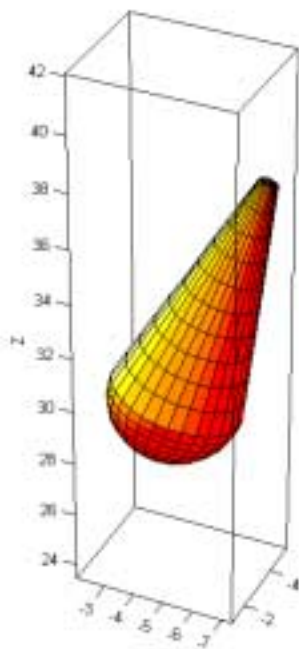
Содержимое желчного пузыря описывается следующим образом:

(полусферическая часть)

$$\begin{aligned} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 < r_1^2 \\ \text{и} \quad z_1 < 0; \end{aligned} \quad (47)$$

(коническая часть)

$$\begin{aligned} x_1^2 + y_1^2 < (r_1 - sz_1)^2 \\ \text{и} \quad 0 \leq z_1 \leq h \end{aligned} \quad (48)$$



(б)



(а)

Рис. 16. Желчный пузырь: модель (а), реальный орган (б).

Таблица 20. Коэффициенты для системы координат  $(x_1, y_1, z_1)$ .

Фантом	$\alpha_1$	$\beta_1$	$\gamma_1$	$\alpha_2$	$\beta_2$	$\gamma_2$	$\alpha_3$	$\beta_3$	$\gamma_3$
10 лет	0.9722	0	-0.2342	-0.0400	0.9853	-0.1661	0.2307	0.1709	0.9579
15 лет	0.9550	0	-0.2964	-0.0606	0.9789	-0.1952	0.2903	0.2044	0.9349
взрослый	0.9615	0	-0.2748	-0.0574	0.9779	-0.2008	0.2687	0.2090	0.9403

Таблица 21. Параметры для желчного пузыря.

Фантом	$r_1$	$r_2$	$s$	$h$	$x_0$	$y_0$	$z_0$
10 лет	1.768	1.874	0.2275	7.07	-1.69	-2.69	21.77
15 лет	1.916	2.031	0.2275	7.66	-3.98	-3.14	27.04
взрослый	2.000	2.120	0.2275	8.00	-4.50	-3.20	30.00

(51).

**Желудок.** Стенки желудка занимают объем между двумя концентрическими эллипсоидами:

$$\left(\frac{x-x_0}{a}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b}\right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{c}\right)^2 \leq 1 \quad (49)$$

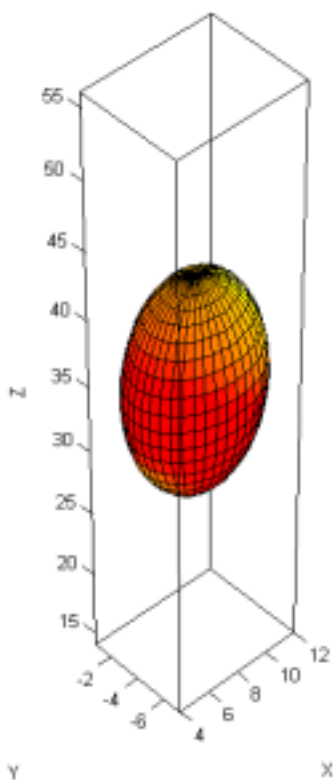
$$\text{и} \left(\frac{x-x_0}{a-d}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b-d}\right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{c-d}\right)^2 \geq 1 \quad (50).$$

$(x_0, y_0, z_0)$  – координаты центра рассматриваемого органа;

$d$  – толщина стенки желудка.

Содержимое представлено объемом внутреннего эллипсоида:

$$\left(\frac{x-x_0}{a-d}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b-d}\right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{c-d}\right)^2 \leq 1 \quad (51).$$



(а)



(б)

Рис 17. Желудок: модель (а), реальный орган (в).

Таблица 22. Параметры для желудка.

Фантом	a	b	c	d	$x_0$	$y_0$	$z_0$
10 лет	3.14	2.74	5.81	0.53	5.56	-3.51	25.40
15 лет	3.43	2.92	7.16	0.56	6.90	-3.92	31.55
взрослый	4.00	3.00	8.00	0.613	8.00	-4.00	35.00

Желудок не рассматривается как полый орган. Оценка средней дозы зависит от степени протяженности желудка, наличия воздушных пространств и т.п.

**Тонкая кишка.** Тонкая кишка не имеет какого-либо “стандартного расположения”, исключая концы, которые относительно фиксированы. Тонкая кишка считается занимающей объем, внутри которого она свободно движется. Попытка определить специфическую конфигурацию здесь не сделана, поэтому стенки и содержимое не различимы для оценки дозы.

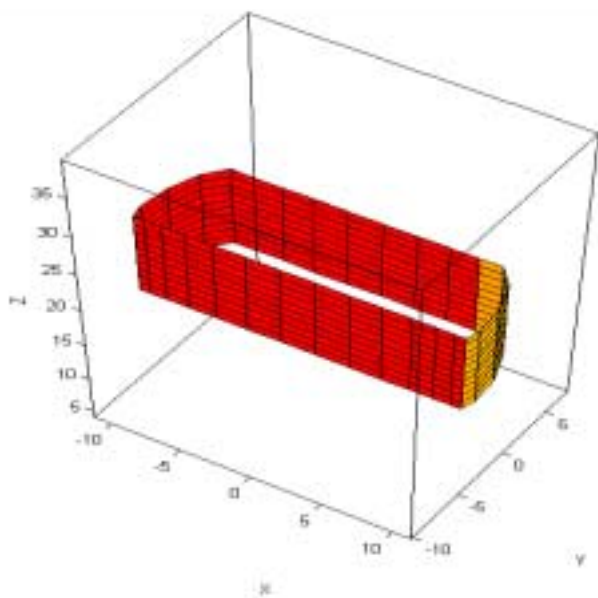
Тонкая кишка и ее содержимое представлены частью эллиптического цилиндра, усеченного двумя параллельными плоскостями  $u = y_1$  и  $u = y_2$ :

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b}\right)^2 \leq 1 \quad (52),$$

$$z_1 \leq z \leq z_2 \quad (53),$$

$$y_1 \leq y \leq y_2 \quad (54).$$

$z_1, z_2$  определяют высоту усеченного цилиндра .



(a)



(б)

Рис. 18. Тонкая кишка: модель (а), реальный орган (б).

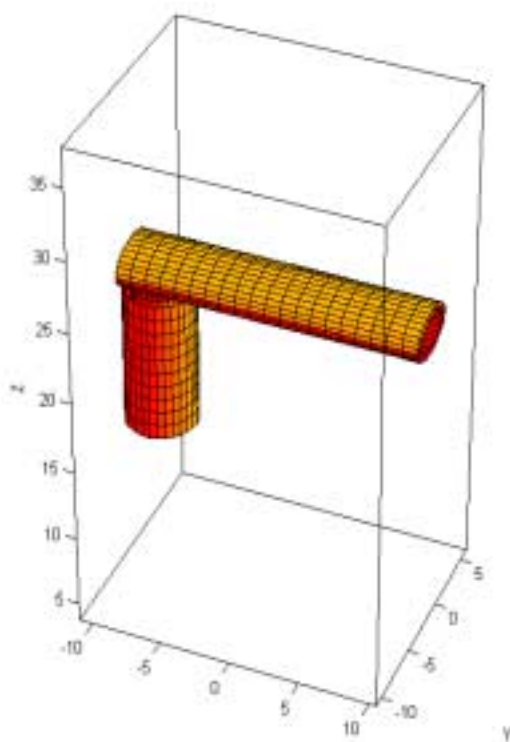


Фрагмент толстой кишки внутри этой области исключен.

Таблица 23. Параметры для тонкой кишки.

Фантом	a	b	y <sub>0</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	z <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>
10 лет	7.85	9.49	-3.19	-4.08	1.85	12.34	19.59
15 лет	9.75	11.07	-3.72	-4.76	2.16	15.32	21.34
взрослый	11.30	11.30	-3.80	-4.86	2.20	17.00	27.00

**Верхний отдел толстой кишки.** Верхний отдел толстой кишки состоит из восходящей и поперечной кишки.



(а)

(б)

Рис. 19. Верхний отдел толстой кишки: модель (а), реальный орган (б).

На рисунке 19(б) изображены верхний и нижний отделы толстой кишки.

Восходящая толстая кишка определяется пространством между двумя коаксиальными эллиптическими цилиндрами:

$$\left(\frac{x-x_0}{a}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b}\right)^2 \leq 1 \quad (55),$$

$$\left(\frac{x-x_0}{a-d}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b-d}\right)^2 \geq 1 \quad (56),$$

$$\text{и } z_1 \leq z \leq z_2 \quad (57).$$

$(x_0, y_0)$  – координаты центра оснований цилиндров, моделирующих восходящую кишку;

$d$  – толщина стенки органа;

$z_1, z_2$  определяют высоту цилиндров.

Содержимое определяется пространством в пределах внутреннего цилиндра:

$$\left(\frac{x-x_0}{a-d}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b-d}\right)^2 < 1 \quad (58)$$

$$\text{и } z_1 \leq z \leq z_2 \quad (59).$$

Таблица 24. Параметры восходящей толстой кишки.

Фантом	a	b	d	$x_0$	$y_0$	$z_1$	$z_2$
10 лет	1.74	2.10	0.54	-5.91	-1.98	10.49	17.42
15 лет	2.16	2.45	0.65	-7.33	-2.31	13.03	21.63
взрослый	2.50	2.50	0.7085	-8.5	-2.36	14.45	24.00

Стенки поперечной кишки определены пространством между двумя коаксиальными эллиптическими цилиндрами:

$$\left(\frac{y-y_0}{b}\right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{c}\right)^2 \leq 1 \quad (60),$$

$$\left(\frac{y-y_0}{b-d}\right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{c-d}\right)^2 \geq 1 \quad (61),$$

$$\text{и } -x_1 \leq x \leq x_1 \quad (62).$$

$(x_0, y_0)$  – координаты центра оснований цилиндров, моделирующих поперечную кишку;

$d$  – толщина стенки органа;

$x$  определяет высоту цилиндров.

Содержимое также определяется пространством в пределах внутреннего цилиндра:

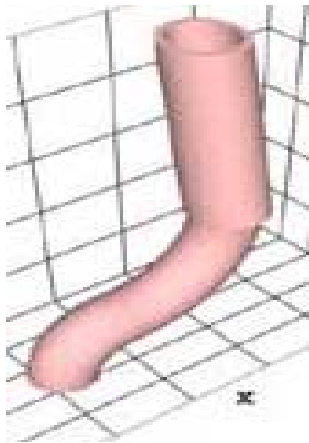
$$\left(\frac{y-y_0}{b-d}\right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{c-d}\right)^2 < 1 \quad (63),$$

$$\text{и } -x_1 \leq x \leq x_1 \quad (64).$$

Таблица 25. Параметры поперечной кишки.

Фантом	b	C	d	$y_0$	$z_0$	$x_1$
10 лет	2.10	1.08	0.40	-1.98	18.51	7.30
15 лет	2.45	1.35	0.49	-2.31	22.99	9.06
взрослый	2.50	1.50	0.527	-2.36	25.50	10.50

**Нижний отдел толстой кишки.** Нижний отдел толстой кишки состоит из нисходящей и сигмовидной кишки (рис. 19, 20).



(а)



(б)

Рис. 20. Нижний отдел толстой кишки: модель (а), реальный орган (б).

Стенки нисходящей кишки определены пространством между двумя коаксиальными эллиптическими цилиндрами. Ось цилиндра образует незначительный угол с осью  $z$  фантома, а концы нисходящей кишки определяются горизонтальными плоскостями ( $z = z_1$  и  $z = z_2$ ). Стенки задаются как

$$\left(\frac{x-x_0}{a}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b}\right)^2 \leq 1 \quad (65),$$

$$\left(\frac{x-x_0}{a-d}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b-d}\right)^2 \geq 1 \quad (66),$$

$$\text{и } z_1 \leq z \leq z_2 \quad (67),$$

где

$$x_0 = x_1 + \frac{m_x(z - z_2)}{z_2 - z_1} \quad (68)$$

$$\text{и } y_0 = \frac{m_y(z_1 - z)}{z_2 - z_1} \quad (69).$$

$(x_0, y_0)$  – координаты центра оснований цилиндров, моделирующих поперечную кишку;

$d$  – толщина стенки органа;

$z_1, z_2$  определяют высоту цилиндра;

$x_1$  – координата  $x$  центра нижнего основания эллиптического цилиндра;

$m_x$  и  $m_y$  – сдвиги верхнего основания цилиндра относительно верхнего по осям  $x$  и  $y$  соответственно;

Содержимое нисходящей кишки определено пространством в пределах внутреннего цилиндра, то есть

$$\left(\frac{x - x_0}{a - d}\right)^2 + \left(\frac{y - y_0}{b - d}\right)^2 < 1 \quad (70),$$

$$\text{и } z_1 \leq z \leq z_2 \quad (71).$$

Таблица 26. Параметры нисходящей кишки.

Фантом	a	b	d	$x_1$	$m_x$	$m_y$	$z_1$	$z_2$
10 лет	1.31	1.79	0.40	6.43	0.5421	2.100	6.33	17.42
15 лет	1.62	2.09	0.49	7.98	0.6728	2.450	7.86	21.63
взрослый	1.88	2.13	0.54	9.25	0.7800	2.500	8.72	24.00

Сигмовидная кишка и ее содержимое изображены частями двух сплюснутых торов. Ось каждого тора – окружность, но поперечное сечение – эллипс. Стенки определяются следующим образом:

(часть верхнего тора)

$$\left(\frac{\sqrt{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2} - R_1}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 \leq 1 \quad (72),$$

$$\left( \frac{\sqrt{(x-x_0)^2 + (z-z_0)^2} - R_1}{a-d} \right)^2 + \left( \frac{y}{b-d} \right)^2 \geq 1 \quad (73),$$

$$x \geq x_0, \text{ и } z \leq z_0 \quad (74).$$

(часть нижнего тора)

$$\left( \frac{\sqrt{(x-x_0)^2 + z^2} - R_2}{a} \right)^2 + \left( \frac{y}{b} \right)^2 \leq 1 \quad (75),$$

$$\left( \frac{\sqrt{(x-x_0)^2 + z^2} - R_2}{a-d} \right)^2 + \left( \frac{y}{b-d} \right)^2 \geq 1 \quad (76),$$

$$x \leq x_0, \text{ и } z \geq 0 \quad (77).$$

$d$  – толщина стенки сигмовидной кишки;

$R_1$  и  $R_2$  – радиусы осей верхнего и нижнего торов соответственно;

Пара плоскостей  $x = x_0, z = z_0$  и  $x = x_0, z = 0$  отсекает от верхнего и нижнего торов соответственно части, моделирующие сигмовидную кишку.

Содержимое сигмовидной кишки определяется следующим образом:

(часть верхнего тора)

$$\left( \frac{\sqrt{(x-x_0)^2 + (z-z_0)^2} - R_1}{a-d} \right)^2 + \left( \frac{y}{b-d} \right)^2 < 1 \quad (78),$$

$$x \geq x_0, \text{ и } z \leq z_0 \quad (79);$$

(часть нижнего тора)

$$\left( \frac{\sqrt{(x-x_0)^2 + z^2} - R_2}{a-d} \right)^2 + \left( \frac{y}{b-d} \right)^2 < 1 \quad (80),$$

$$x \leq x_0, \text{ и } z \geq 0 \quad (77).$$

Таблица 27. Параметры сигмовидной кишки.

Фантом	a	b	d	$x_0$	$z_0$	$R_1$	$R_2$
10 лет	0.96	1.50	0.48	2.09	6.33	4.15	2.18
15 лет	1.18	1.76	0.59	2.59	7.86	5.16	2.70
взрослый	1.57	1.57	0.66	3.00	8.72	5.72	3.00

**Сердце.** Внешняя поверхность сердца изображается четырьмя четвертями эллипсоидов. Внутри этой поверхности сердце разделено на области, представляющие мышечные стенки и четыре камеры. Данные ниже уравнения в  $(x_1, y_1, z_1)$  – координатах, связанных с системой координат  $(x, y, z)$  следующими уравнениями в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} \quad (81).$$

$(x_0, y_0, z_0)$  – координаты центра рассматриваемого органа;

$\begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 \end{bmatrix}$  - матрица перехода от одной системы координат к другой

В приведенных ниже уравнениях в переменных, названных VX, AVY, LAVZ, RAVZ, AX, TLVW, TRVW и TAW, буквы L и R означают левое (left) и правое (right), A и V – предсердие (atrium) и желудочек (ventricle) соответственно, T – толщина (thickness), W – стенка (wall), и X, Y, Z – размер по величине  $x_1, y_1, z_1$  соответственно.

VX – общий размер желудочков по величине  $x_1$ ;

AVY - общий размер предсердий и желудочков по величине  $y_1$ ;

LAVZ - общий размер левого предсердия и левого желудочка по величине  $z_1$ ;

RAVZ - общий размер правого предсердия и правого желудочка по величине  $z_1$ ;

AX - общий размер предсердий по величине  $x_1$ ;

TLVW – толщина стенки левого желудочка;

TRVW - толщина стенки правого желудочка;

TAW - толщина стенки предсердий.

Левый желудочек (стенка + содержимое) представляется половиной эллипсоида. Стенка определяется неравенствами:

$$\left(\frac{x_1}{VX}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{AVY}\right)^2 + \left(\frac{z_1}{LAVZ}\right)^2 \leq 1,$$

$$\left(\frac{x_1}{VX - TLVW}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{AVY - TLVW}\right)^2 + \left(\frac{z_1}{LAVZ - TLVW}\right)^2 \geq 1, \quad (82)$$

и  $x_1 \geq 0$ .

Содержимое левого желудочка – объем, заключенный внутри меньшей из приведенных выше половин эллипсоидов, то есть

$$\left(\frac{x_1}{VX - TLVW}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{AVY - TLVW}\right)^2 + \left(\frac{z_1}{LAVZ - TLVW}\right)^2 < 1,$$

и  $x_1 \geq 0$ . (83)

Правый желудочек (стенка + содержимое) изображается четвертью эллипсоида, который включает в себя около половины левого желудочка. Стенки определяются неравенствами:

$$\left(\frac{x_1}{VX}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{AVY}\right)^2 + \left(\frac{z_1}{RAVZ}\right)^2 \leq 1,$$

$$\left(\frac{x_1}{VX - TRVW}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{AVY - TRVW}\right)^2 + \left(\frac{z_1}{RAVZ - TRVW}\right)^2 \geq 1, \quad (84)$$

$x_1 \geq 0$ , и  $z_1 < 0$ .

Общая для левого и правого желудочка стенка считается частью стенки левого желудочка и здесь исключена.

Содержимое правого желудочка определяется неравенствами:

$$\left(\frac{x_1}{VX - TRVW}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{AVY - TRVW}\right)^2 + \left(\frac{z_1}{RAVZ - TRVW}\right)^2 < 1,$$

$x_1 \geq 0$ , и  $z_1 < 0$ . (85)

Часть левого желудочка внутри этого пространства исключена, поэтому должно выполняться неравенство

$$\left(\frac{x_1}{VX}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{AVY}\right)^2 + \left(\frac{z_1}{LAVZ}\right)^2 > 1 \quad (86).$$

Левое предсердие (стенка + содержимое) изображается двумя примыкающими четвертями эллипсоидов. Левая предсердная стенка определяется следующим образом:

(часть 1)

$$\begin{aligned} \left(\frac{x_1}{AX}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{AVY}\right)^2 + \left(\frac{z_1}{LAVZ}\right)^2 &\leq 1, \\ \left(\frac{x_1}{AX-TAW}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{AVY-TAW}\right)^2 + \left(\frac{z_1}{LAVZ-TAW}\right)^2 &\geq 1, \end{aligned} \quad (87)$$

$$x_1 < 0, \text{ и } z_1 \geq 0;$$

(часть 2)

$$\begin{aligned} \left(\frac{x_1}{AX}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{AVY}\right)^2 + \left(\frac{z_1}{LAVZ-TLVW+TAW}\right)^2 &\leq 1, \\ \left(\frac{x_1}{AX-TAW}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{AVY-TAW}\right)^2 + \left(\frac{z_1}{LAVZ-TLVW}\right)^2 &\geq 1, \end{aligned} \quad (88)$$

$$x_1 < 0, \text{ и } z_1 < 0.$$

Содержимое левого предсердия изображается объемом внутри этих стенок:

(часть 1)

$$\begin{aligned} \left(\frac{x_1}{AX-TAW}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{AVY-TAW}\right)^2 + \left(\frac{z_1}{LAVZ-TAW}\right)^2 &< 1, \\ x_1 < 0, \text{ и } z_1 \geq 0; \end{aligned} \quad (89)$$

(часть 2)

$$\begin{aligned} \left(\frac{x_1}{AX-TAW}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{AVY-TAW}\right)^2 + \left(\frac{z_1}{LAVZ-TLVW}\right)^2 &< 1, \\ x_1 < 0, \text{ и } z_1 < 0. \end{aligned} \quad (90)$$

Правое предсердие (стенка + содержимое) изображается четвертью эллипсоида, который включает в себя некоторую часть левого предсердия. Стенка определяется неравенствами:



$$\left(\frac{x_1}{AX}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{AVY}\right)^2 + \left(\frac{z_1}{RAVZ}\right)^2 \leq 1,$$

$$\left(\frac{x_1}{AX - TAW}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{AVY - TAW}\right)^2 + \left(\frac{z_1}{RAVZ - TAW}\right)^2 \geq 1, \quad (91)$$

$$x_1 < 0 \text{ и } z_1 < 0.$$

Объем общей для левого и правого предсердия стенки считается частью стенки левого предсердия и здесь исключен.

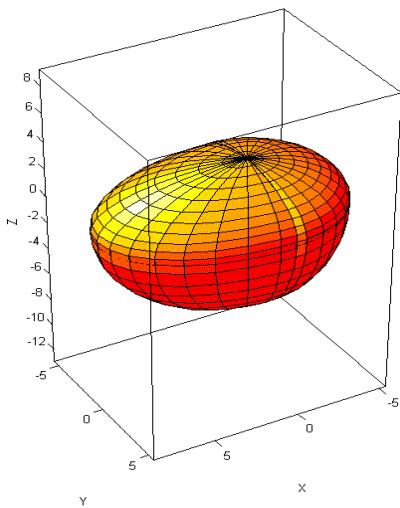
Содержимое правого предсердия определяется неравенствами:

$$\left(\frac{x_1}{AX - TAW}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{AVY - TAW}\right)^2 + \left(\frac{z_1}{RAVZ - TAW}\right)^2 < 1,$$

$$x_1 < 0 \text{ и } z_1 < 0 \quad (92).$$

Часть левого предсердия внутри этого пространства исключается, поэтому должно выполняться неравенство:

$$\left(\frac{x_1}{AX}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{AVY}\right)^2 + \left(\frac{z_1}{LAVZ - TLVW + TAW}\right)^2 > 1 \quad (93)$$



(б)

(а)

Рис 21. Сердце: модель (а), реальный орган (б).

Величины всех параметров сердца, зависящие от возраста, даны в таблице 29.

Таблица 28. Коэффициенты для матрицы перехода.

Фантом	$\alpha_1$	$\beta_1$	$\gamma_1$	$A_2$	$\beta_2$	$\gamma_2$	$\alpha_3$	$\beta_3$
--------	------------	-----------	------------	-------	-----------	------------	------------	-----------

10 лет	0.6345	-0.5370	-0.5559	-0.4243	0.3591	-0.8312	0.6460	0.7663
15 лет	0.6453	-0.5134	-0.5658	-0.4428	0.3523	-0.8245	0.6226	0.7825
взрослый	0.6751	-0.4727	-0.5664	-0.4640	0.3249	-0.8241	0.5736	0.8191

Таблица 29. Параметры для сердца.

Фантом	VX	AVY	LAVZ	RAVZ	AX	TLVW	TRVW	TAW	X <sub>0</sub>	y <sub>0</sub>	z <sub>0</sub>
10 лет	6.73	3.92	2.43	5.48	4.23	1.02	0.47	0.23	0.80	-1.70	36.60
15 лет	7.86	4.57	2.83	6.40	4.94	1.19	0.55	0.27	0.86	-2.10	45.10
взрослый	8.60	5.00	3.10	7.00	5.40	1.30	0.60	0.30	1.00	-1.80	50.00

**Почки.** Каждая почка задается эллипсоидом, усеченным двумя плоскостями:

$$\left(\frac{x-x_0}{a}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b}\right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{c}\right)^2 \leq 1$$

и  $|x| \geq x_1$ . (94)

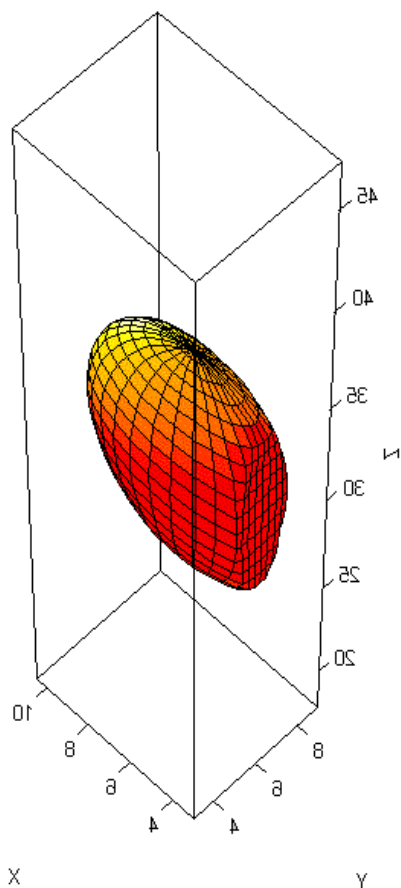
(x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>, z<sub>0</sub>) – координаты центра рассматриваемого органа;

x = x<sub>1</sub> и x = -x<sub>1</sub> – уравнения плоскостей, отсекающих эллипсоиды, моделирующие левую и правую почки соответственно.

В таблице 30 значение x<sub>0</sub> берется положительным для левой почки и отрицательным для правой.

Таблица 30. Параметры для почек.

Фантом	a	b	c	x <sub>0</sub>	y <sub>0</sub>	z <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>
10 лет	3.66	1.47	3.99	±4.17	5.04	23.59	1.74
15 лет	4.05	1.53	4.96	±5.18	5.88	29.30	2.48
взрослый	4.50	1.50	5.50	±6.00	6.00	32.50	3.00



(a)



(б)

Рис. 22. Правая почка: модель (а), реальный орган (б).

**Печень.** Печень задается эллиптическим цилиндром, усеченным ПЛОСКОСТЬЮ:

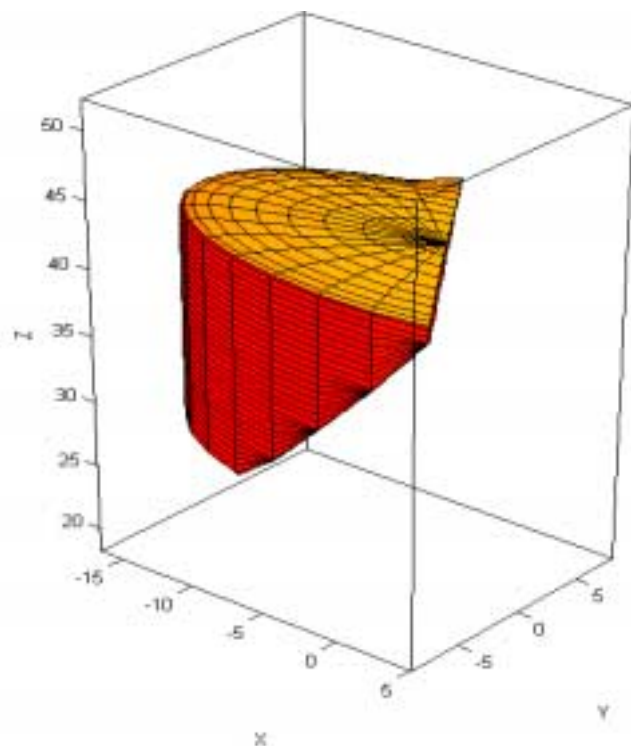
$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 \leq 1,$$

$$z_1 \leq z \leq z_2,$$

$$\frac{x}{x_m} + \frac{y}{y_m} - \frac{z}{z_m} \leq -1. \quad (95)$$

Таблица 31. Параметры для печени.

ФАНТОМ	a	b	x <sub>m</sub>	y <sub>m</sub>	z <sub>m</sub>	z <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>
10 лет	11.43	6.83	21.98	29.67	31.21	19.59	31.21
15 лет	14.19	7.84	31.51	44.75	38.76	24.34	38.76
взрослый	16.50	8.00	35.00	45.00	43.00	27.00	43.00



(а)



(б)

Рис.23. Печень: модель (а), реальный орган (б).

**Легкие. Каждое легкое изображается половиной эллипсоида с удаленной частью, которая больше для левого легкого из-за положения сердца.**

**Правое легкое определяется следующим образом**

$$\left(\frac{x+x_0}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{c}\right)^2 \leq 1$$

и

$$z \geq z_0;$$

(96)

Если  $z_{1R} \leq z \leq z_{2R}$  и  $y < y_{1R}$ , то должно выполняться неравенство  $x \leq x_{1R}$ . Эти неравенства описывают удаленную часть правого легкого.

Выражения для левого легкого аналогичны, только  $(x + x_0)$  заменяется на  $(x - x_0)$ ;  $z_{1R}$ ,  $z_{2R}$ ,  $y_{1R}$  на  $z_0$ ,  $z_{2L}$ ,  $y_{1L}$  соответственно; и неравенство  $(x \leq x_{1R})$  заменяется на  $(x \geq x_{1L})$ . Буквы R и L означают правое (right) и левое (left) легкое соответственно.

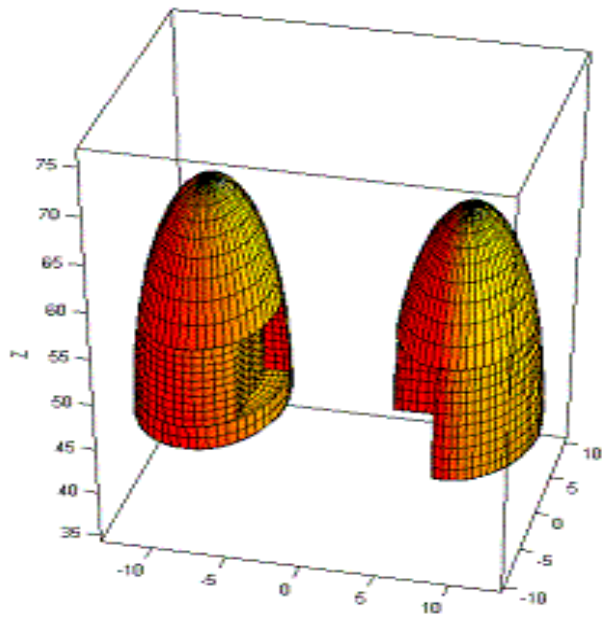


Рис. (а) (б)  
 Легкие: модель (а), реальный орган (б).  
 Таблица 32. Параметры для легких.

ФАНТОМ	a	b	c	x <sub>0</sub>	z <sub>0</sub>
10лет	3.82	6.30	17.42	5.91	31.57
15 лет	4.09	6.98	20.55	7.33	39.21
взрослый	5.00	7.50	24.00	8.50	43.50

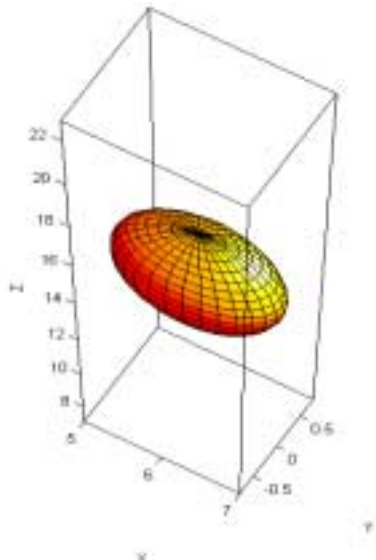
Таблица 32а. Параметры, учитывающие удаленные из половин эллипсоидов фрагменты.

ФАНТОМ	x <sub>1R</sub>	y <sub>1R</sub>	z <sub>1R</sub>	z <sub>2R</sub>	x <sub>1L</sub>	y <sub>1L</sub>	z <sub>2L</sub>
10 лет	-4.10	1.30	33.40	39.60	+5.90	0.75	40.00
15 лет	-5.00	1.20	41.60	48.50	+7.00	0.70	49.00
взрослый	-5.40	1.50	46.00	54.00	+8.00	1.00	55.00

**Яичники.** Каждый яичник представлен эллипсоидом:

$$\left(\frac{x-x_0}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{c}\right)^2 \leq 1 \quad (97).$$

Таблица 33. Параметры для яичников.



ФАНТОМ	a	b	c	x <sub>0</sub>	z <sub>0</sub>
10 лет	0.66	0.40	1.36	±4.17	10.8
15 лет	1.17	0.58	1.80	±5.18	13.5
взрослый	1.00	0.50	2.00	±6.00	15.0



(a)

(б)

Рис. 25. Левый яичник: модель (а), реальный орган (б).

Таблица 33. Параметры для яичников.

Фантом	a	b	c	$x_0$	$z_0$
10 лет	0.66	0.40	1.36	$\pm 4.17$	10.89
15 лет	1.17	0.58	1.80	$\pm 5.18$	13.52
взрослый	1.00	0.50	2.00	$\pm 6.00$	15.00

**Поджелудочная железа.** Поджелудочная железа представлена половиной эллипсоида с вырезанной областью:

$$\left(\frac{x-x_0}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{c}\right)^2 \leq 1,$$

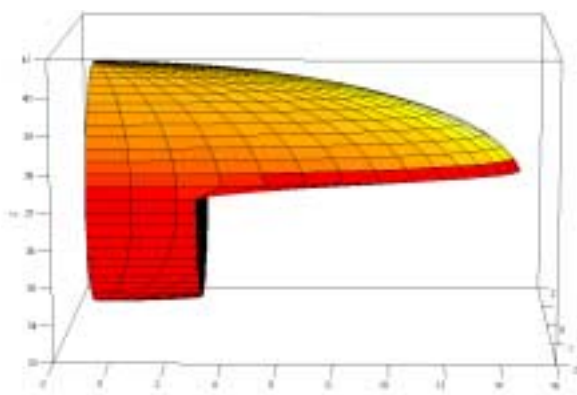
$$x \geq x_0, \quad (98)$$

$$\text{и } z \geq z_0 \text{ если } x > x_1 \quad (99).$$

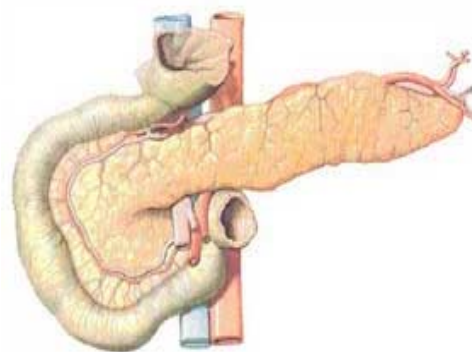
$x = x_0$  и  $x = x_1$  – уравнения плоскостей, секущих половину эллипсоида, моделирующего поджелудочную железу.

Таблица 34. Параметры для поджелудочной железы.

Фантом	a	b	c	$x_0$	$z_0$	$x_1$
10 лет	10.09	0.92	2.17	-0.38	26.85	2.15
15 лет	13.32	1.14	2.87	-0.72	33.35	2.61
взрослый	16.00	1.20	3.30	-1.00	37.00	3.00



(a)

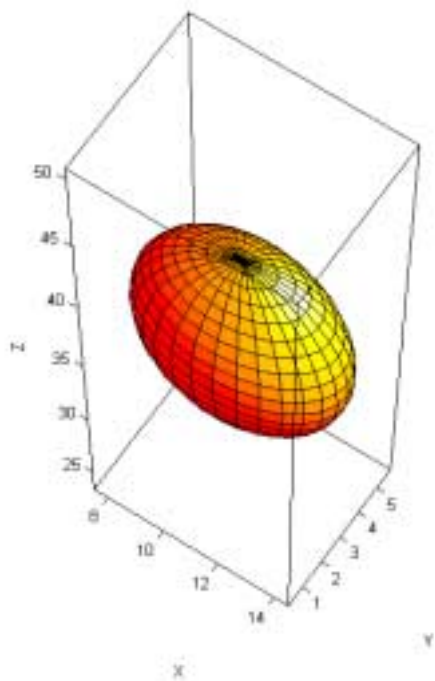


(б)

Рис. 26. Поджелудочная железа: модель (а), реальный орган (б).

**Селезенка.** Селезенка изображается эллипсоидом:

$$\left(\frac{x-x_0}{a}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b}\right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{c}\right)^2 \leq 1 \quad (100).$$



(б)



(a)

Рис. 27. Селезенка: модель (а), реальный орган (б).

Таблица 35. Параметры для селезенки.

Фантом	a	b	c	$x_0$	$y_0$	$z_0$
10 лет	2.43	1.68	4.35	7.65	2.52	26.85
15 лет	2.90	1.88	5.19	9.49	2.94	33.35
взрослый	3.50	2.00	6.00	11.00	3.00	37.00

**Семенники.** Семенники задаются эллипсоидом:

$$\left(\frac{x \pm a}{a}\right)^2 + \left(\frac{y - y_0}{b}\right)^2 + \left(\frac{z + c}{c}\right)^2 \leq 1 \quad (101),$$

где знак “±” берется положительным для левого и отрицательным для правого органа.

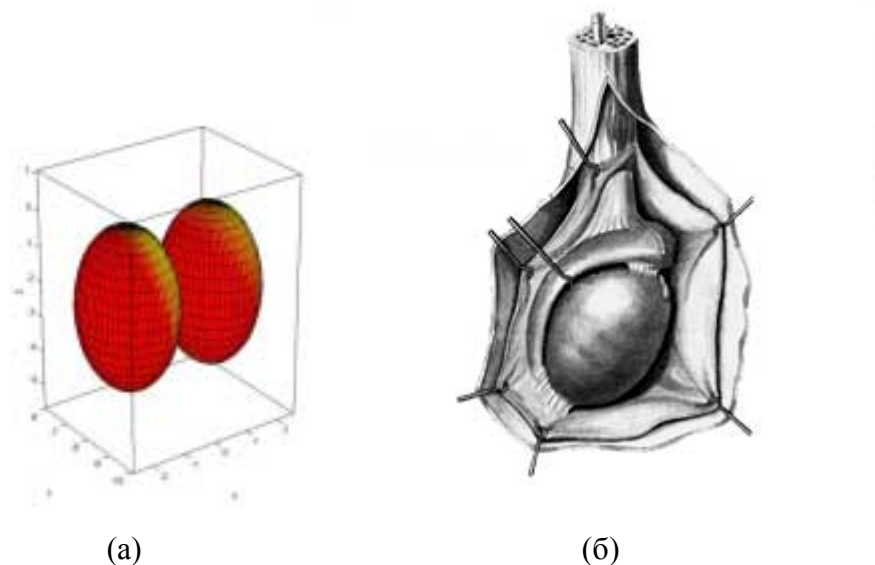


Рис. 28. Семенники: модель (а), реальный орган (б).

Таблица 36. Параметры для семенников.

Фантом	a	b	c	y <sub>0</sub>
10 лет	0.47	0.55	0.84	-6.15
15 лет	0.96	1.10	1.69	-7.10
взрослый	1.30	1.50	2.30	-8.00

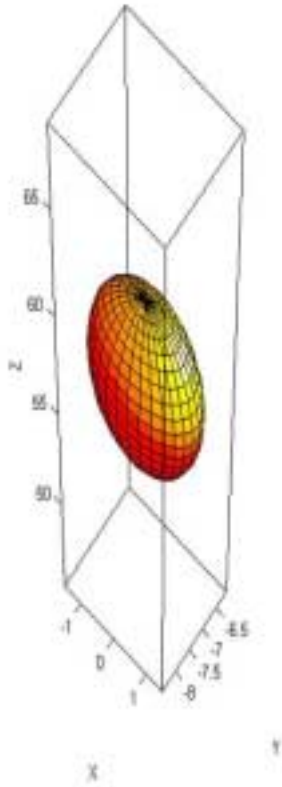
**Вилочковая железа.** Вилочковая железа моделируется эллипсоидом:

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y - y_0}{b}\right)^2 + \left(\frac{z - z_0}{c}\right)^2 \leq 1 \quad (102).$$

Таблица 37. Параметры для вилочковой железы.

Фантом	a	b	c	y <sub>0</sub>	z <sub>0</sub>
10 лет	1.85	1.00	3.90	-6.13	43.00
15 лет	1.75	0.93	4.00	-7.15	52.00
взрослый	1.50	0.80	4.00	-7.30	57.00





(a)



(б)

Рис. 29. Вилочковая железа: модель (а), реальный орган (б).

**Щитовидная железа.** Доли щитовидной железы лежат между двумя концентрическими цилиндрами и имеют изрезанную поверхность. Формулы для определения этого органа имеют вид:

$$x^2 + (y - y_0)^2 \leq R^2, \quad (103)$$

$$x^2 + (y - y_0)^2 \geq r^2, \quad (104)$$

$$y \leq y_0, \quad (105)$$

$$C_T \leq z \leq C_T + c, \quad (106)$$

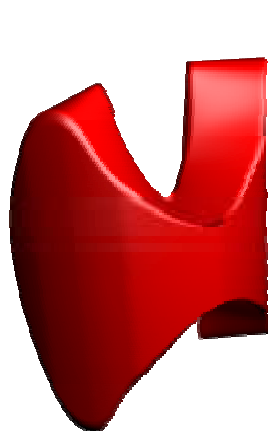
$$[(y - y_0) - |x|]^2 \geq 2[x^2 + (y - y_0)^2] \tau^2, \quad (107)$$

где 
$$\tau = \left( \frac{\sqrt{2} - 2}{2} \right) \left( \frac{z - C_T}{0.25c} \right) + 1 \quad \text{для } 0 \leq z - C_T \leq 0.25c \quad (108)$$

и 
$$\tau = \left( \frac{\sqrt{2} - 2}{2} \right) \left( \frac{z - C_T}{0.75c} \right) + \frac{2\sqrt{2} - 1}{3} \quad \text{для } 0.25 \leq z - C_T \leq c \quad (109).$$

R и r – радиусы внутреннего и внешнего цилиндров соответственно;

$C_T$  – высота цилиндра, моделирующего тело человека.



(a)



(б)

Рис. 30. Щитовидная железа: модель (а), реальный орган (б).

Таблица 38. Параметры для щитовидной железы.

Фантом	R	r	c	$y_0$	$C_T$
10 лет	1.60	0.73	3.63	-3.56	50.80
15 лет	1.85	0.83	4.20	-3.91	63.10
взрослый	2.20	1.00	5.00	-4.00	70.00

**Мочевой пузырь.** Стенки мочевого пузыря представлены объемом между двумя концентрическими эллипсоидами:

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b}\right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{c}\right)^2 \leq 1 \quad (110)$$

$$\text{и } \left(\frac{x}{a-d}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b-d}\right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{c-d}\right)^2 \geq 1. \quad (111)$$

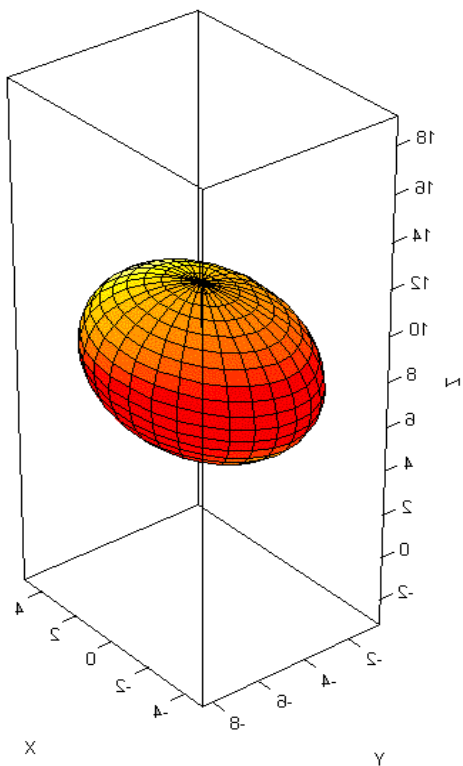
$d$  – толщина стенки мочевого пузыря.

Содержимое задается объемом внутреннего эллипсоида:

$$\left(\frac{x}{a-d}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b-d}\right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{c-d}\right)^2 < 1. \quad (112)$$

Таблица 39. Параметры для мочевого пузыря.

Фантом	a	b	c	d	$y_0$	$z_0$
10 лет	3.61	3.04	2.63	0.20	-3.78	5.81
15 лет	4.27	3.38	3.11	0.23	-4.41	7.21
взрослый	4.958	3.458	3.458	0.252	-4.50	8.00



(а) (б)



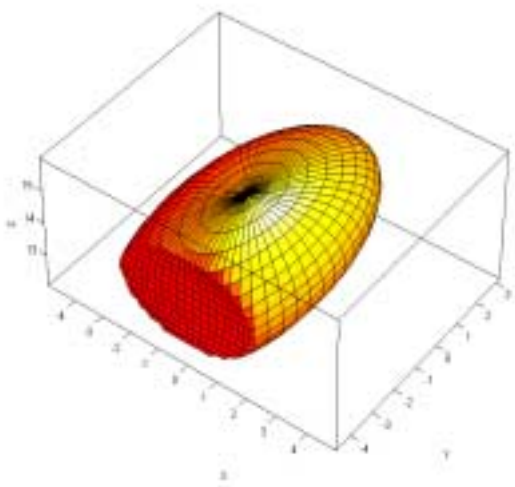
Рис. 31. Мочевой пузырь: модель (а), реальный орган (б).

**Матка.** Матка – ЭЛЛИпсоид,

пересекаемый плоскостью, задается выражениями:

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b}\right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{c}\right)^2 \leq 1$$

$$y \geq y_1. \quad (113)$$



(б)



(а)

Рис. 32. Матка: модель (а), реальный орган (б).

Таблица 40. Параметры для матки.

Фантом	a	b	c	y <sub>0</sub>	z <sub>0</sub>	y <sub>1</sub>
10 лет	0.91	2.17	0.57	-1.68	10.16	-2.78
15 лет	2.47	5.61	1.55	-1.96	12.62	-4.77
взрослый	2.62	5.22	1.57	-2.00	14.00	-4.62

Таблица 41. Координаты центров органов для фантомов человека.

Орган	Координаты центра органа (x, y, z), см								
	10 лет			15 лет			взрослый		
Надпочечники	±2.43	4.20	28.94	±3.02	4.90	35.87	±3.50	5.00	39.88
Мозг	0.00	0.00	65.99	0.00	0.00	79.07	0.00	0.00	86.85
Грудные железы	±7.05	-7.57	37.73	±9.23	-9.89	46.86	±10.54	-10.09	52.00
Ст. желч.пузыря	-1.35	-2.44	23.20	-3.51	-2.81	28.55	-4.05	-2.85	31.59
Ст.н.о.толст.к-ки.	4.93	-0.59	7.93	6.11	-0.68	9.83	7.05	-0.70	10.93
Ст.тонк.кишки	0.24	-0.86	15.61	0.29	-1.00	19.38	0.35	-1.03	21.50
Ст. желудка	5.56	-3.51	25.40	6.90	-3.92	31.55	8.00	-4.00	35.00
Ст. в.о.толст.к-ки	-2.56	-1.98	16.54	-3.15	-2.31	20.55	-3.67	-2.36	22.80
Ст. сердца	1.44	-3.38	35.55	1.65	-4.03	43.85	1.98	-3.84	48.64
Почки	±4.40	5.04	23.59	±5.43	5.88	29.30	±6.28	6.00	32.50
Печень	-5.94	-1.56	26.65	-7.68	-1.65	33.51	-8.92	-1.62	37.06
Легкое (левое)	6.30	0.51	38.70	7.72	0.46	47.55	9.00	0.48	53.23
Легкое (правое)	-6.08	0.06	38.20	-7.46	0.03	47.00	-8.64	0.01	52.60
Яичники	±4.17	0.00	10.89	±5.18	0.00	13.52	±6.00	0.00	15.00
Поджелуд.железа	2.72	0.00	27.20	3.37	0.00	33.81	3.93	0.00	37.53
Селезенка	7.65	20.52	26.85	9.49	2.94	33.35	11.00	3.00	37.00
Семенники	±0.47	-6.15	-0.84	±0.96	-7.10	-1.69	±1.30	-8.00	-2.30
Вилочков. железа	0.00	-6.13	43.00	0.00	-7.15	52.00	0.00	-7.30	57.00
Щитовид. железа	0.00	-4.37	52.43	0.00	-4.84	64.98	0.00	-5.11	72.25
Ст. моч. пузыря	0.00	-3.78	5.81	0.00	-4.41	7.21	0.00	-4.50	8.00
Матка	0.00	-1.41	10.16	0.00	-1.26	12.62	0.00	-1.35	14.00

Таблица 42. Масса внутренних органов человека (г). Относительная погрешность от 2 до 5%.

Орган	10 лет	15 лет	взрослый
Надпочечники	7,22	10,5	16,3
Мозг	1360	1410	1420
Грудн. железы (включая кожу)	3,65	407	403
Грудн. железы (исключая кожу)	2,60	361	351
Желчный пузырь (содержимое)	38,5	49,0	55,7
Желчный пузырь (стенки)	7,28	9,27	10,5

Н. о. т. к. (содержимое)	61,7	109	143
Н. о. т. к. (стенки)	70	127	167
Тонкая кишка	465	838	1100
Желудок (содержимое)	133	195	260
Желудок (стенки)	85,1	118	158
В. о. т. к. (содержимое)	97,5	176	232
В. о. т. к. (стенки)	93,4	168	220
Сердце (содержимое)	219	347	454
Сердце (стенки)	151	241	316
Почки	173	248	299
Печень	887	1400	1910
Легкие	453	651	1000
Яичники	3,13	10,5	8,71
Поджелудочная железа	30,0	64,9	94,3
Мягкие ткани	23100	40000	51800
Селезенка	77,4	123	183
Семенники	1,89	15,5	39,1
Вилочковая железа	31,4	28,4	20,9
Щитовидная железа	7,93	12,4	20,7
Мочевой пузырь (содержимое)	103	160	211
Мочевой пузырь (стенки)	23,2	35,9	47,6
Матка	4,16	79,0	79,0
Кожа	888	2150	3010

### 3. Химический состав органов человека.

Таблица 43. Содержание элементов в тканях фантома (% от веса)

Элемент	Мягкие ткани	Скелет	Легкие
H	10,454	7,337	10,134
C	22,66	25,475	10,238
N	2,490	3,057	2,866
O	63,525	47,893	75,752

F	0	0,025	0
Na	0,112	0,326	0,184
Mg	0,013	0,112	0,007
Si	0,030	0,002	0,006
P	0,134	5,095	0,080
S	0,204	0,173	0,225
Cl	0,133	0,143	0,266
K	0,208	0,153	0,194
Ca	0,024	10,190	0,009
Fe	0,005	0,008	0,037
Zn	0,003	0,005	0,001
Rb	0,001	0,002	0,001
Sr	0	0,003	0
Zr	0,001	0	0
Pb	0	0,001	0
<b>Плотность, г/см<sup>3</sup></b>	<b>1,00 ± 0,05</b>	<b>1,40 ± 0,05</b>	<b>0,28 ± 0,02</b>

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хайн Дж., Браунелл Г. Радиационная дозиметрия. М.: Издательство иностранной литературы, 1958.
2. Фатеева М.Н. Очерки радиоизотопной диагностики. М.: Медгиз, 1960.
3. Loevinger R., Berman M. MIRD. Pamphlet №1. "J. Nucl. Med". 1968. Suppl. №1, p. 7 – 14.

4. Snyder W., Ford M., Warner G. MIRD, Pamphlet № 5 “J. Nucl. Med”, 1969 Suppl № 3, p. 5-52.
5. Осанов Д., Лихтерев И. Дозиметрия излучений инкорпорированных радиоактивных веществ. М.: Атомиздат, 1977.
6. Тултаев А., Тарасенко Ю., Попов В., Корсунский В. Фармакологические и дозиметрические характеристики некоторых изотопов таллия. “Методы получения изотопов таллия и их применение в ядерной медицине”. Москва. 1989.
7. Cristy M., Eckerman K. Specific absorbed fraction of energy of various ages from internal photons sources. ORNL/TM – 8381/V/ Oak Ridge. 1987.
8. Documentation package MIRDOSE – 3. Radiation internal dose information center Oak Ridge Institute for Science and Education. TN 37831. 1994.
9. Лабушкина А.А. Сравнительная оценка отечественных кардиотропных РФП. Дис. КМН. М. 2000.
10. Hwang J., Shoup R., Poston J. Modifications and additions to the pediatric and adult mathematical phantoms. ORNL/TM – 5554. 1976.
11. Cristy M. Mathematical phantoms representing children of various ages for use in estimates of internal dose. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Rep. NUREG/CR – 1159.
12. Stabin M., Watson E., Cristy M. at all. Mathematical models of the adult female of various stages of pregnancy. Rep. ORNL/TM – 3781. 1994.
13. ICRP: Radionuclide Transformations Energy and Intensity of Emissions. Publ. №38. Pergamon Press Oxford. New York. 1987.
14. Weber D., Eckerman K. at all. MIRD: Radionuclide data and decay schemes. Society of Nuclear Medicine. New York. 1989.
15. Метод Монте-Карло в проблеме переноса излучений под ред. Г.И. Марчука. М.: - Атомиздат. 1967.

16. Аккерман А.Ф. Моделирование траекторий заряженных частиц в веществе. М.: Энергоатомиздат, 1991.
17. Физическая энциклопедия. М.: Большая российская энциклопедия. Т. 3, 1992.
18. Кучин Н.Л., Струев В.П. Моделирование процессов взаимодействия и численные методы расчета переноса излучения в веществе. С-Пб, 1999.
19. Горшков Г.В. Проникающие излучения радиоактивных источников. Л.: Наука, 1967.
20. Человек. Медико-биологические данные МКРЗ. Публ. №23. М.: Медицина, 1977.
21. Привес М.Г., Лысенков Н.К. Бушкович В.И. Анатомия человека. С-Пб.: Гиппократ, 1998.
22. Синельников Р.Д., Синельникова Я.Р. Атлас анатомии человека: Учеб. пособие. В 4-х т. М.: Медицина, 1990.
23. Уэстон, Тревор. Анатомический атлас. Маршалл Кэвендиш, 1998.
24. Савинский А., Попов В., Кушмин В. Спектры ЛПЭ и коэффициенты качества инкорпорированных радионуклидов. М.: Энергоатомиздат. 1986.
25. Государственные санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Нормы радиационной безопасности (НРБ – 99). Минздрав России. 1999.
26. Spenser L., Simmons G. Improved moment method calculations of gamma-ray transport: application to point isotropic sources in water. Nucl. Sci. Eng. 50, 1973.



**Людмила Владимировна Евсеенко**  
**Афанасий Алексеевич Куракин**  
**Антон Васильевич Тултаев**  
**Александр Петрович Черняев**

**Математическая модель фантома человека  
в радионуклидной диагностике и терапии**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2002 – 24/708

Работа поступила в ОНТИ 26.09.2002 г.

**ИД № 00545 от 06.12.1999**

**Издательский отдел**  
**Учебно-научного центра довузовского образования**

117246, Москва, ул. Обручева, 55А  
119992, Москва, Ленинские горы, ГЗ МГУ, Ж-105а  
тел./факс (095) 718-6966, 939-3934  
e-mail: [izdat@abiturcenter.ru](mailto:izdat@abiturcenter.ru)  
<http://www.abiturcenter.ru>

Гигиенический сертификат №77.99.2.925.П.9139.2.00 от 24.02.2000  
Налоговые льготы – Общероссийский Классификатор продукции  
ОК-005-93, том 1 – 953000

Заказное. Подписано в печать 27.09.2002г. Формат 60×90/16  
Бумага офсетная № 2. Усл.печ.л. 4.0  
Тираж 50 экз. Заказ №223

Отпечатано в Мини-типографии УНЦ ДО  
в полном соответствии с качеством  
представленного оригинал-макета