

**ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗЫ ПО ТЕЛУ ПОСТРАДАВШЕГО ПРИ
АВАРИЙНОМ ОБЛУЧЕНИИ С ПОМОЩЬЮ ВОКСЕЛ-ФАНТОМНОЙ
ТЕХНОЛОГИИ**

Хамидулин Т.М., Соловьев В.Ю.

Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И.Бурназяна ФМБА России,

123182, г. Москва, ул. Живописная, 46

тел. (499)728-57-13, e-mail: ashteroid@post.ru, soloviev.fmbc@gmail.com

Резюме: Рассмотрена технология расчета распределения дозы по телу человека при неравномерном облучении с использованием воксел-фантома ICRP стандартного человека. Проведена проверка на двух случаях аварийного облучения имевших место в прошлом, в том числе со сложной геометрией положения тела пострадавшего относительно источника излучения. Сравнение результатов показало удовлетворительную сходимость расчетных и фактических данных.

Ключевые слова: *оценка дозы, аварийное облучение, воксель фантом, монте-карло, моделирование*

**BODY DOSE DISTRIBUTION ASSESSMENT IN CASE OF ACCIDENTAL EXPOSURE
USING VOXEL PHANTOM TECHNOLOGY**

Khamidulin T.M., Soloviev V.Yu.

Summary: Method of human body dose distribution calculation after nonuniform irradiation, using ICRP Reference Man voxel phantom, has been developed and tested. Two incidents that had happened in the past, with complex geometry between body and radiation source were studied. The results of comparison showed good correlation between calculated and observed data.

Keywords: *dose assessment, accidental exposure, voxel phantom, monte carlo, modeling*

Цель

Использование воксел-фантомной технологии для оценки распределения дозы по телу человека при ретроспективном анализе случаев аварийного облучения.

Введение

Одной из задач разработки стратегии и тактики лечения пострадавших в результате радиационных инцидентов является адекватная оценка степени тяжести радиационного поражения. В ФМБЦ им. А.И.Бурназяна ФМБА России создана уникальная база данных по острым лучевым поражениям человека [1]. База данных содержит около 200 полностью верифицированных историй болезни пострадавших в радиационных авариях, большинство из которых были облучены относительно равномерно по телу. И можно с уверенностью констатировать, что при относительно равномерном облучении задача оценки степени тяжести лучевого поражения, методами биологической дозиметрии, решена [2].

В то же время остается проблемой адекватный прогноз степени тяжести лучевого поражения в случае неравномерного по телу облучения. Проблема корректной оценки распределения дозы по телу является чисто технической, но достаточно трудоемкой. В прошлом были предприняты определенные попытки решения данной задачи [3], но технология использования фантома Кристи является весьма специфичной, т.к. требует для своего осуществления многолетнего опыта работы со специальными расчетными программами (например, «РОБОТ» [3]) и, в значительной степени, индивидуализирована.

С развитием технологии воксел-фантомных расчетов появляется принципиальная возможность создания вычислительного комплекса для решения задач аварийной дозиметрии и диагностики степени тяжести радиационного поражения острой лучевой болезни в условиях аномального облучения.

Воксел-фантомная технология предполагает использование трех этапов: снятие компьютерной томограммы конкретного человека, создание компьютерного воксел-фантомного образа исследуемого пациента и расчет с использованием сведений о геометрии облучения и программ расчета прохождения излучения через вещество, использующих метод Монте-Карло. В то же время, требуемая для практики точность позволяет в ряде случаев пренебречь различием в ряде параметров конкретного пострадавшего и т.н. «стандартного» человека. Это дает возможность для подобных оценок использовать унифицированные воксел-фантомы. Таковыми, в частности, являются стандартные воксел-фантомы мужчины и женщины ICRP, конструируемые исходя из национальных принадлежностей [4].

Материал и методы

Для решения поставленной задачи нами использовались воксел-фантомы стандартного человека ICRP из Публикации ICRP № 110 [4].

В качестве расчетной программы использовался комплекс MCNP5 версии 1.30. Т.к. формат представления данных фантома в приложении к [4] не подходит для использования в MCNP, была написана специальная программа-конвертор на языке программирования C++. Для контроля расчетов и преобразования информации из цифровой в графическую была написана специальная программа на языке C++.

Воксел-фантом ICRP представляет собой модель тела человека, помещенную в прямоугольный параллелепипед, заполненный воздухом, и разделенный на ячейки (воксели) одинакового размера. Каждая ячейка несет в себе номер органа, к которому она принадлежит, а каждому органу соответствует свой материал (ткань), обозначающий содержимое этой ячейки, а также объемную плотность материала. Ячейки, не принадлежащие к фантому, заполнены воздухом. Задавая таким образом разные материалы для разных ячеек, можно получить трехмерную модель человека. В женском фантоме ICRP содержится более 14 млн вокселей (299 x 137 x 348). Размеры вокселя составляют 1.78 x 1.78 x 4.8 мм. Мужской фантом ICRP содержит более 7 млн вокселей (254 x 127 x 222). Размеры вокселя составляют 2.14 x 2.14 x 8 мм.

Для решения задачи расчета распределения дозы по телу человека, существует необходимость модификации стандартного усредненного фантома под реальные параметры пострадавшего. Мы считаем, что это возможно путем введения геометрического коэффициента, учитывающего рост и комплекцию конкретного пострадавшего. При задании геометрии задачи расчета в MCNP, можно изменять размеры вокселя в любом измерении, будь то ширина, высота, или глубина. При этом размеры органов неизбежно искажаются, но на практике этим можно пренебречь.

Метод расчета распределения дозы по телу человека был апробирован на одном модельном и двух реальных случаях аварийного облучения.

В первом случае моделируется пребывание людей на открытой местности в поле радиоактивных аэрозолей воздуха. Перечень наиболее важных радионуклидов, содержащихся в воздухе в результате радиоактивного выброса в первый день радиационной аварии на ЧАЭС 1986 г. был взят из [5]. Расчет распределения дозы по телу производился с нормировкой дозы на величину «поглощенная доза в воздухе на высоте 1 м в точке расположения фантома в отсутствии фантома», равную 3 Гр. Источник

моделировался сферой с центром в точке расположения фантома на высоте середины фантома, ограниченной снизу плоскостью (поверхностью земли).

Далее нами был выполнен расчет распределения дозы по телу для двух реальных случаев облучения: пострадавшей Г. [6,7] в результате инцидента с источником ^{60}Co (длительность облучения около 10 сек), имевшего место в 1961 г., рис. 1, и пострадавшего Н., в результате инцидента с источником ^{137}Cs , в 1982г., рис. 2 [8].

В базе данных по острым лучевым поражениям ФМБЦ им А.И.Бурназяна [1] рассматриваемым пострадавшим был присвоен уникальный клинический номер: №3041, и пациент №3002 соответственно.

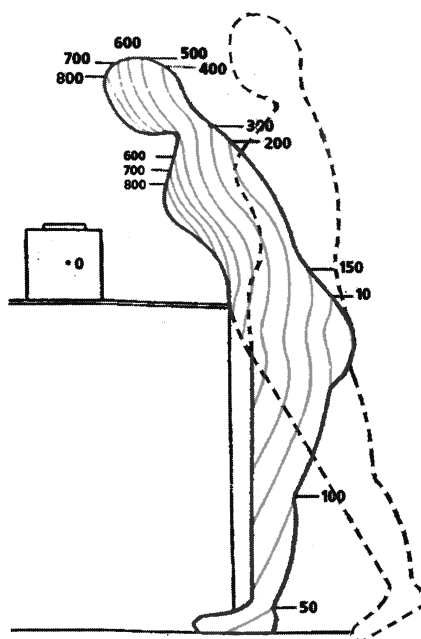


Рис. 1. Положение тела пострадавшей Г. в результате радиационного инцидента с источником ^{60}Co [6,7] и схема преобразования геометрии для проведения воксел-фантомных расчетов (два варианта положения фантома относительно источника излучения), также выделены изодозные линии.

При рассмотрении второго случая нами выполнены расчеты для отдельных участков фантома, искусственно разделенных для воспроизведения геометрии реального облучения, рис. 1. Расчет произведен для двух положений фантома относительно источника. Первый – «стоячий фантом», нижняя часть туловища в геометрии облучения, характерной для пострадавшей. Для нее проводилась первая часть вычислений (на рисунке для этого случая верхняя часть тела обозначена пунктиром). Второй – «наклоненный фантом», для которого, проводится расчет для верхней части тела уже при другой геометрии расположения источника относительно фантома (верхняя часть тела, для которой проводятся вычисления с соответствующей геометрией расположения источника относительно «наклоненного» тела). После проведения соответствующих

расчетов сделана «сшивка» геометрии и воспроизведение распределения дозы по телу для нестандартного (частично наклоненного) расположения тела пострадавшей относительно источника излучения в данном конкретном инциденте. Также на рисунке изображены изодозные линии, полученные в результате экспериментального моделирования условий облучения данного пациента.

Третий случай – моделирование ситуации для одного из пострадавших в инциденте 1982 года, когда военнослужащие по очереди носили в кармане плаща-накидки некий предмет, который впоследствии оказался источником ^{137}Cs . В данном случае, прямое использование стандартного воксел-фантома было невозможно, т.к. программа MCNP не позволяет располагать источник излучения в пределах параллелепипеда воксельного фантома. Для преодоления этого ограничения фантом был разделен на 2 части, как показано на рис. 2.



Рис 2. Задание геометрии для третьего случая, пострадавший Н. [8]

Две части фантома показаны желтым пунктиром. Розовым цветом показан источник излучения, красным – ткани, содержащие красный костный мозг, белым – костная ткань.

Для сопоставления результатов вычислений с реальной ситуацией было взято распределение дозы по телу пострадавшего Н. из работы [8], представленное на рис 3.



Рис 3. Распределение дозы по телу для третьего случая, пострадавший Н. [8].

Результаты и обсуждение

Результаты вычисления распределения доз по телу для модельного расчета и двух реальных случаев показаны на рис. 4.

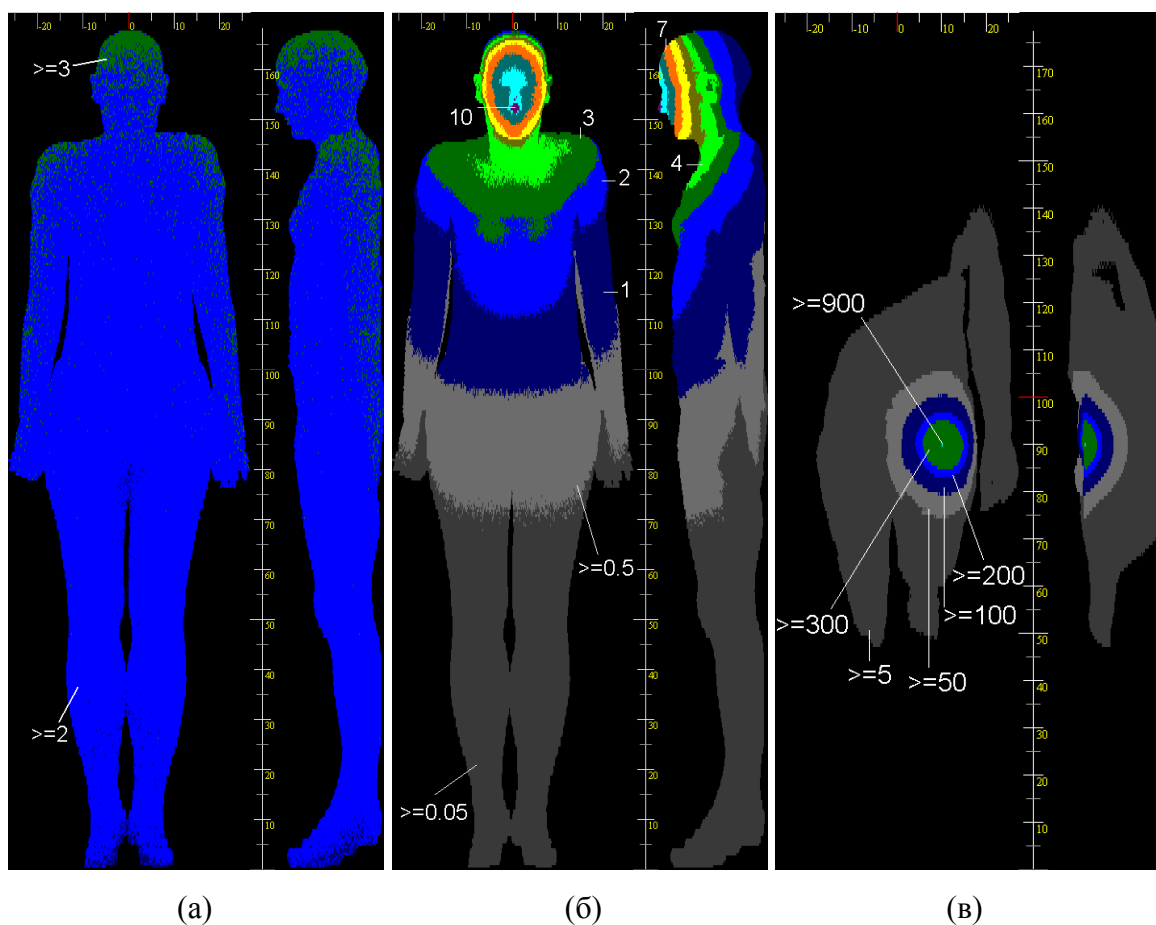


Рис 4. Распределение дозы по телу для трех вариантов расчета: а) моделирование нахождения человека в облаке радиоактивных аэрозолей; б) пострадавшая Г. [1], после «сшивки» результатов вычисления; в) пострадавший Н. [8]. Цветом выделены дозовые интервалы, с численным обозначением границ.

Результаты расчетов для пострадавших сравнивались с изодозными линиями: в первом случае (рис. 1), полученными при экспериментальном моделировании условий облучения, а во втором, изодозные линии были восстановлены методом ЭПР-спектрометрии с использованием фрагментов одежды пострадавшего (рис. 3).

Степень расхождения расчетов с данными, полученными иными путями в среднем являются удовлетворительными для практических нужд. Незначительные расхождения могут быть обусловлены как точностью самого метода, так и дополнительными погрешностями, связанными с неточностью восстановления геометрии тела пострадавших, оценкой времени контакта с источником и использованием стандартизованного фантома вместо реального воксел-фантомного образа. В целом, удовлетворительная сходимость вычисленных значений с фактическими данными подтверждает работоспособность метода.

Так как расчет позволяет оценить также распределение дозы по всем органам, то для всех рассмотренных случаев были получены данные распределения костного мозга по дозе, приведенные на рис 5.

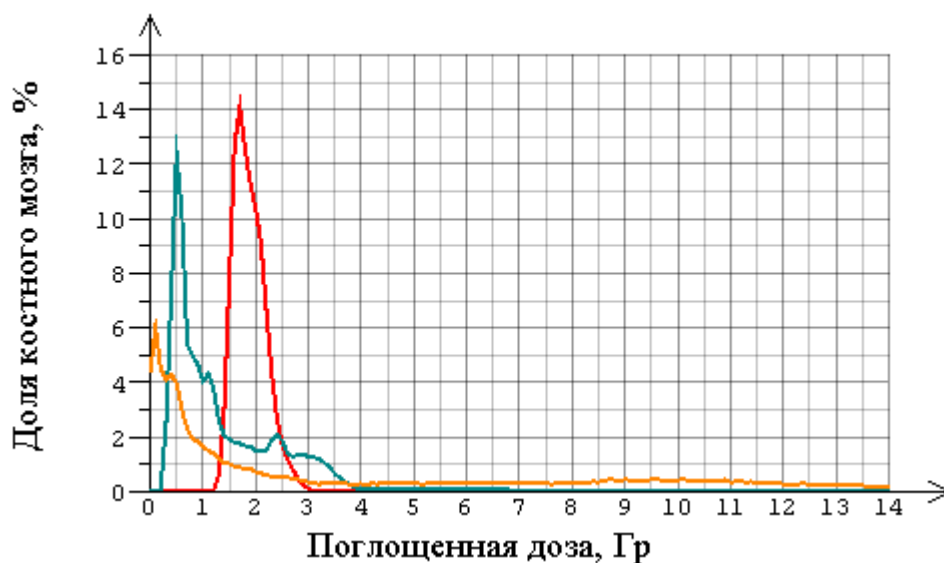


Рис 5. Распределение дозы по костному мозгу стандартного человека (воксел-фантом ICRP [4]) в случае его расположения в воздухе газо-аэрозольного выброса (красная линия) смеси радиоактивных продуктов, характерной для первого дня аварии на ЧАЭС 1986 г.; пострадавшая Г. (зеленая линия), и пострадавший Н. (оранжевая линия).

Облучение на открытой местности является практически равномерным, а два других случая имеют существенную асимметрию, что следует из рисунка 5.

Данные распределения костного мозга по дозе имеют практическое значение при прогнозировании течения костномозгового синдрома острой лучевой болезни.

Выводы

В результате проделанной работы отработан алгоритм расчета распределения дозы по телу человека, включая жизненно важные органы и костный мозг, в результате аварийного облучения с помощью воксел-фантомной технологии.

Данная технология расчетов может быть использована в аварийной дозиметрии, а также для оптимизации локальной защиты организма человека при планируемом повышенном облучении в условиях массо-габаритных ограничений (например, при пилотируемых космических полетах или при проектировании физической защиты рабочего места операторов критсборок).

Авторы благодарят А.В.Барабанову и И.Н.Шейно за консультации при подготовке материалов для публикации данной работы.

Литература

1. Котенко К.В., Барабанова А.В., Баранов А.Е. и соавт. База данных по острым лучевым поражениям человека. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2010620390 от 23.07.2010 г. – М.: ФМБЦ им А.И. Бурназяна ФМБА России, 2010.
2. Барабанова А.В., Баранов А.Е., Бушманов А.Ю., Гуськова А.К. Радиационные поражения человека. Избранные клинические лекции, методическое пособие. Под ред. А.Ю.Бушманова, В.Д.Ревы. – М.: фирма «Слово», 2007. – 176 с.
3. Класс Е.В., Шаховский В.В., Клещенко Е.Д. и соавт. Реконструкция дозы в случае аварийного облучения в Лие (Грузия). //Атомная энергия. – 2006. – Т. 100, № 2. – С. 149–153.
4. ICRP. ICRP Publication 110: Adult Reference Computational Phantoms. //Ann. ICRP. – 2009. – 137 p.
5. Алексахин Р.М., Булдаков Л. А., Губанов В.А. и соавт. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры. Под общей ред. Л.А. Ильина и В.А. Губанова. – М.: ИздАТ, 2001. – С. 297–306.
6. Гуськова А.К., Байсоголов Г.Д. Лучевая болезнь человека. – М.: Медицина, 1971. – 384 с.
7. Радиационная медицина. Руководство для врачей-исследователей и организаторов здравоохранения. Радиационные поражения человека. Под общей ред. Ильина Л.А. – М.: ИздАТ, 2001. – Т. 2. – 432 с.
8. Barabanova A.V. Acute Radiation Syndrome with Cutaneous Syndrome. In: The Medical Basis for Radiation Accident Preparedness. The Clinical Care of Victims. Proceedings of the Fourth International REAC/TS Conference on Medical Basis for Radiation Accident Preparedness. March 2001, Orlando, Florida. The Parthenon Publishing Group. P. 217—224.