

**ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ТКАНЕЭКВИВАЛЕНТНЫХ  
ФАНТОМОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ  
ИЗЛУЧЕНИЙ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА  
НА РАДИАЦИОННО-ОПАСНЫХ ОБЪЕКТАХ**

Карцев И.С.<sup>1</sup>, Еременко В.Г.<sup>2</sup>, Никаноров А.Г.<sup>2</sup>,  
Петров В.И.<sup>2</sup>, Поленов Б.В.<sup>2</sup>, Юдин В.Н.<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>ЗАО «СНИИП-Плюс», <sup>2</sup>ФГУП «НИЦ «СНИИП»

Для оценки риска возникновения отдаленных последствий радиационного облучения необходимо знать пространственное распределение эквивалентной дозы в теле человека [1]. Такие данные могут быть получены путем экспериментальных исследований дозового поля в фантомах - специальных устройствах, моделирующих биологический объект или некоторую его часть.

Исходя из основной сути фантомных исследований – получение адекватных данных о результатах воздействия ионизирующего излучения на организм человека, подбор материала фантома, с рассеивающими и поглощающими свойствами при взаимодействии ионизирующего излучения максимально приближенными к тканям человека, является одной из основных задач при создании тканеэквивалентного фантома. Массовая доля химических элементов, входящих в состав стандартизованного тканеэквивалентного вещества, должна соответствовать значениям, указанным в таблице 1 [2].

Таблица 1

Химический состав стандартизированного тканеэквивалентного вещества

Химический элемент	Мышечное тканеэквивалентное вещество, %	Костное тканеэквивалентное вещество, %
Водород	10,0	4,0
Углерод	11,1	15,6
Азот	2,8	4,4
Кислород	75,3	44,3
Фосфор	0,2	10,5
Сера	0,3	-
Калий	0,3	-
Кальций	-	21,1

При этом основные критерии выбора того или иного тканеэквивалентного материала должны определяться с учетом состава ионизирующего излучения в данных условиях проводимых экспериментов. Так, в качестве критерия может рассматриваться энергия, передаваемая иони-

зирующим излучением одному электрону среды, характеризующийся значением эффективного атомного номера ( $Z_{\text{эфф}}$ ) (справедливо при воздействии  $\gamma$ -излучения) [3]. При этом для нейтронного излучения в первую очередь следует ориентироваться на содержание атомов азота и углерода [4]. Поскольку передача энергии различных видов излучения материалу связана с различными механизмами взаимодействия ионизирующего излучения с веществом, содержание того или иного химического элемента в материале в разной степени влияет на его тканеэквивалентность.

В экспериментах по оценке уровней радиационного воздействия на организм человека исследователями применяются различные тканеэквивалентные материалы. В общем случае их можно разделить на две группы: однородные материалы (парафин, полиэтилен, плексиглас, вода и др.) и неоднородные - различные твердые и жидкые смеси. Примерами последних могут служить смеси на основе эпоксидных смол с различными наполнителями - крахмалом, минералами или биологическими структурами (например, зерна конопли или пшеницы), а также жидкые растворы на основе воды с добавлением мочевины, сахарозы, различных кислот, спиртов и др. [5,6]. К основным недостаткам материалов первой группы следует отнести отклонения атомарного состава от стандартизованного материала [2] за счет отсутствия одного или нескольких основных химических элементов, содержащихся в ткани человека. Для неоднородных материалов свойственны технологические сложности, связанные с производством заготовок для изготовления тканеэквивалентных фантомов, в особенности сложных геометрических форм, а также трудность воспроизведения свойств этих материалов в разных производственных циклах.

В рамках подготовки Международного космического проекта «Матрешка-Р» специалистами ФГУП НИЦ «СНИИП», ГНЦ ИМБП РАН и РХТУ им. Д.И. Менделеева при создании тканеэквивалентного фантома был синтезирован уникальный материал (форполимер - ТДИ). Этот материал, получивший название «Глобус», был создан с учетом жестких эксплуатационных требований для применения в условиях длительных космических полетов и особенностей характеристик ионизирующего космического излучения, для которого свойственны разнообразие состава ионизирующих частиц (ядра химических элементов от водорода до урана) и широкий энергетический спектр (энергии частиц до  $10^{13}$  Мэв). По сравнению с ранее применявшимися в дозиметрических экспериментах аналогами, этот материал обладал следующими достоинствами, которые подтверждены необходимыми сертификатами и протоколами испытаний:

- приближенность атомарного состава к составу «нормативного» тканеэквивалентного вещества [1] по сравнению с другими аналогами;
- низкое газовыделение в окружающую среду;
- пожаробезопасность;
- хорошая механическая обрабатываемость (твердость по Шору не менее 90 единиц);
- гомогенность по всей массе материала и отсутствие механических повреждений и включений воздуха в заготовках;
- устойчивость к температурным перепадам от -40°C до +50°C;
- устойчивость к воздействию влаги (не гигроскопичен);
- неподверженность воздействию микроорганизмов;
- технологичность в изготовлении и пригодность для массового производства.

В качестве исходного аналога синтезированного материала «Глобус» был выбран, хорошо зарекомендовавший себя в дозиметрических экспериментах европейский тканеэквивалентный материал «Rando» [7]. Сопоставление химических составов материалов «Rando» и «Глобус» со стандартизованным материалом (по ICRP) представлены в таблице 2.

Таблица 2

Сравнительные данные по содержанию основных химических элементов для материалов «Rando», «Глобус» и стандартизованного материала (по ICRP)

Наименование параметра	Содержание в %				
	Стандартизованный материал (по ICRP)	«Rando»		«Глобус»	
		«Rando»	Отклонение от стандартизованного материала (по ICRP), %	Полиуретан «ГЛОБУС»	Отклонение от стандартизованного материала (по ICRP), %
Водород	10	9,18	-0,8	8,7	-1,3
Азот	2,6	2,5	-0,1	2,6	0,0
Кислород	61	20,31	-40,7	32,2	-28,8
Углерод	23	67,78	+44,78	56,5	+33,5
Плотность г/см <sup>2</sup>	1,07	0,997	-0,07	1,1	+0,03

На основании вышеизложенного, область применения созданного под руководством специалистов ФГУП НИЦ «СНИИП» тканеэквивалентного фантома, изготовленного на основе российского материала

«Глобус», прошедшего успешную аprobацию в условиях реального космического полета, может быть существенно расширена и распространена на другие радиационно-опасные объекты, где достаточно велика вероятность возникновения существенных дозовых перепадов. В качестве таких объектов могут рассматриваться объекты атомной спецтехники, атомные электростанции, радиохимические заводы, хранилища радиоактивных отходов и др. При этом химическая формула тканеэквивалентного материала «Глобус» и технология его изготовления таковы, что позволяют достаточно просто изменять соотношение основных с точки зрения взаимодействия с тем или иным видом ионизирующего излучения элементов (водород, азот, кислород, углерод), делая максимальный акцент на процентное содержание тех элементов тканеэквивалентного вещества, которые являются наиболее важными при оценке воздействия конкретного состава ионизирующего излучения. Этот эффект достигается изменением соотношения дополнительно вводимых компонентов. Физико-механические свойства нового материала позволяют отработать технологический процесс его изготовления и реализовать широкое промышленное внедрение.

## Литература

1. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99) СП 2.6.1.758 – 99. Минздрав России, М.1999.
2. ГОСТ 18622-79. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. Химический состав тканеэквивалентного вещества.
3. Иванов В.И. «Курс дозиметрии», издание второе переработанное и дополненное, М.: Атомиздат, 1970. С.125-137.
4. «Тканевые дозы нейтронов в теле человека». Справочник, М., Атомиздат, 1972 г., с.154-157.
5. Radiation Protection Dosimetry. Vol.89. Nos 3-4, 239-242, 301-304, 2000.
6. Smirennyi L.N., Litvinova E.G., Khortsev A.V.. Study of Spatial Distribution of Tissue Doses with the Aid of a Phantom-mannequin. The Third International Congress of Protection Association. September 9-14, 1973, Washington, New-York, p.42.
7. Yasuda H., Komiyama T., Badhwar G.D. et al. Organ/Tissue Doses Mesured with Solid-State Integrating Dosemeters in a Low-Earth-Orbit Space Mission.