

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/306320629>

Comparison of dose equivalents from charged particles and neutrons inside the spherical tissue-equivalent phantom on...

Article · January 2016

CITATIONS

0

READS

56

8 authors, including:



[Vyacheslav Shurshakov](#)

Институт медико-биологических пр...

163 PUBLICATIONS 981 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Jordanka Semkova](#)

Bulgarian Academy of Sciences

53 PUBLICATIONS 306 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Rachid Machrafi](#)

University of Ontario Institute of Technology

37 PUBLICATIONS 132 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Cosmic radiation measurements by applying passive dosimeters [View project](#)

УДК 629.7+614.876:001.891.5+613.64

СРАВНЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДОЗЫ ОТ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И НЕЙТРОНОВ ВНУТРИ ШАРОВОГО ТКАНЕЭКВИВАЛЕНТНОГО ФАНТОМА НА БОРТУ РОССИЙСКОГО СЕГМЕНТА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Хулапко С.В.^{1,2}, Лягушин В.И.¹, Архангельский В.В.², Шуршаков В.А.²,
Николаев И.В.¹, Семкова Й. (Semkova J.)³, Смит М. (Smith M.)⁴, Машрафи Р. (Machrafi R.)⁵

¹РКК «Энергия» им. С.П. Королева, г. Королев

²Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

³Институт космических исследований и технологий Болгарской академии наук, г. София, Болгария

⁴Баббл Текнолоджи, Онтарио, Канада

⁵Технологический институт при Университете штата Онтарио, Канада

E-mail: kh_sergey2006@mail.ru

Представлено сравнение эквивалентных доз от заряженных частиц и от нейтронного излучения внутри шарового тканеэквивалентного фантома, измеренных с использованием аппаратуры «Люлин-5» и «Баббл-дозиметр» в космическом эксперименте «Матрешка-Р». Измерения проводились в период основных экспедиций МКС-35/36 (март – сентябрь 2013 г.) и МКС-41/42 (сентябрь 2014 г. – март 2015 г.), когда фантом располагался в Малом исследовательском модуле МИМ1 российского сегмента (РС) МКС. Установлено, что среднесуточная мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения в каналах фантома составляет от 77 ± 13 до 157 ± 25 мкЗв/сут, что соответствует от 17 до 28 % от полной дозы.

Ключевые слова: «Баббл-дозиметр», «Люлин-5», «Матрешка-Р», нейтронное излучение, эквивалентная доза, шаровой фантом, радиационная безопасность.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2016. Т. 50. № 2. С. 47–52.

Ионизирующее излучение космического пространства (ИИ КП) обоснованно считается одним из главных неустраняемых факторов, создающих опасность для жизнедеятельности космонавтов при пилотируемых полетах как на околоземных орбитах, так и при полетах за пределы магнитосферы Земли.

Традиционно выделяют три основных источника ИИ КП: галактические космические лучи (ГКЛ), солнечные космические лучи (СКЛ) и радиационные пояса Земли (РПЗ). Все эти источники достаточно хорошо изучены [1] и состоят преимущественно из высокоэнергетических заряженных частиц – протонов, электронов и тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ).

Дополнительную дозовую нагрузку на экипажи орбитальных станций и пилотируемых космических аппаратов (ПКА) создает нейтронное излучение. На низких околоземных орбитах большая часть эквивалентной дозы от нейтронов формируется

вторичным нейтронным излучением от ядерного взаимодействия между частицами РПЗ, СКЛ и ГКЛ и материалом ПКА [2]. Меньшая часть формируется нейтронами альbedo атмосферы Земли [3, 4]. При этом установлено, что спектр нейтронного излучения сильно меняется в зависимости от ряда параметров, таких, как солнечная активность, высота орбиты полета ПКА, его масса и состав материала обшивки.

В 1990 г. вышел отчет Международной Комиссии по Радиологической защите (МКРЗ, ICRP – International Commission on Radiological Protection) [5], в котором вводится понятие эквивалентной дозы и взвешивающие коэффициенты для различных типов излучения. Как видно из табл. 1, нейтронное излучение оказывает серьезное поражающее воздействие на биологические объекты (большие значения взвешивающих коэффициентов).

Последующие экспериментальные и теоретические работы по определению вклада нейтронов в общую эквивалентную дозу показали, что этот вклад существенно расходитсся и может достигать десятков процентов. Так, например, в самом слабозащищенном отсеке КК «Спейс шаттл» в период максимальной солнечной активности вклад нейтронов в эквивалентную дозу составлял всего 5–8 %, а в хорошо защищенном отсеке в период минимума солнечной активности этот вклад возрастал до 60 % [6]. Для орбитальной станции «Мир» сравнение расчетных значений эквивалентных доз показало, что за толщиной защиты более 40 г/см² эквивалентная доза от нейтронного излучения может даже превышать суммарную эквивалентную дозу от ГКЛ и РПЗ [7].

Кроме того, по некоторым данным при проведении оценок эквивалентных доз от нейтронов с энергией от 1 до 15 МэВ, как это делалось, например, в работе [8], определялось лишь около 30 %

Таблица 1

Взвешивающие коэффициенты различных типов ионизирующего излучения

Тип излучения	Диапазон энергии	Взвешивающий коэффициент, W_R
Фотоны	все энергии	1
Электроны и мюоны	все энергии	1
Нейтроны	менее 10 кэВ	5
	10–100 кэВ	10
	100 кэВ – 2 МэВ	20
	2–20 МэВ	10
	более 20 МэВ	5
Протоны, кроме протонов отдачи	более 2 МэВ	5
Альфа-частицы, осколки деления, ТЗЧ	все энергии	20

Таблица 2

Состав шарового фантома

Элемент	Процентное соотношение, %	Отклонение от стандартного материала (ICRP 60), %
Водород	8,7	-1,3
Азот	2,6	0,0
Кислород	32,2	-28,8
Углерод	56,5	+33,3

эквивалентной дозы от суммарной дозы нейтронов. Все эти факты указывают на необходимость проведения измерения в более широком диапазоне энергии нейтронов – от 0,1 МэВ до, как минимум, 50 МэВ.

Отдельный интерес представляет определение вклада от нейтронного излучения в общую эквивалентную дозу внутри фантомов (антропоморфного или шарового), рекомендованных МКРЗ для практической оценки радиационного воздействия на критические органы человека [9].

Первоначально внутри шарового и антропоморфного фантомов определялись только дозы от заряженных частиц ГКЛ, РПЗ и СКЛ [10, 11].

Целенаправленные измерения эквивалентной дозы от нейтронов внутри шарового фантома впервые проводились в период экспедиций МКС-13/15 в рамках космического эксперимента (КЭ) «Матрешка-Р» с использованием детекторов научной аппаратуры (НА) «Баббл-дозиметр» [12]. Измерения внутри фантома были выполнены, когда он располагался в правой кабине модуля «Звезда» (служебный модуль – СМ) российского сегмента (РС) Международной космической станции (МКС). Одновременно проводились измерения вне фантома в правой и левой каютах модуля «Звезда» и внутри модуля «Пирс» (Стыковочный отсек – СО1).

Повторные измерения эквивалентной дозы от нейтронов внутри фантома проводились в период экспедиций МКС-35/36 и МКС-41/42, когда он

располагался внутри Малого исследовательского модуля (МИМ1). При этом впервые измерения проводились дозиметрическими и спектрометрическими детекторами и, кроме того, одновременно с детекторами научной аппаратуры (НА) «Баббл-дозиметр» в экваториальных каналах фантома располагался детекторный блок НА «Люлин-5» [13].

Методика

Для определения радиационной нагрузки на критические органы человека внутри модулей МКС был разработан шаровой фантом, выполненный из тканезквивалентного материала с химическим составом, соответствующим ГОСТ 18622-79 [14]. Фантом доставили на борт МКС в 2003 г. в соответствии с программой КЭ «Матрешка-Р». Масса оснащенного фантома составляла 32 кг, плотность 1,1 г/см³, его внешний диаметр был равен 350 мм. Данные о составе шарового фантома представлены в табл. 2.

Подробное описание конструктивных особенностей фантома, тип и количество используемых детекторов можно найти в работе [15].

Для определения характеристик нейтронного излучения на борту МКС был разработан специальный комплекс НА «Баббл-дозиметр», включающий в себя набор из 8 детекторов, заполненных специальным гелем, и пульт для считывания информации с этих детекторов.

Пульт НА «Баббл-дозиметр» позволяет автоматически идентифицировать детекторы, фиксировать время начала и окончания измерений, а также подсчитывает количество пузырьков в детекторах и интегральную эквивалентную дозу в каждом детекторе с учетом его индивидуальной чувствительности. Лицевая сторона пульта оснащена жидкокристаллическим (ЖК) сенсорным дисплеем для ввода/вывода информации во время работы космонавтов с детекторами. Пульт «Баббл-дозиметр» оснащен картой памяти ММС, на которую записываются результаты измерений и файлы с изображениями детекторов. По окончании каждой экспедиции карта памяти возвращается на Землю для обработки результатов.

Детекторы НА «Баббл-дозиметр» дают возможность определять интегральную эквивалентную дозу за период экспонирования в диапазоне от 60 кэВ до 50 МэВ (дозиметрические детекторы), а также энергетический спектр в этом же диапазоне энергии (6 пороговых спектрометрических детекторов) для оценки вклада в суммарную дозу нейтронов различной энергии. Более подробно с составом НА «Баббл-дозиметр», характеристиками детекторов, методикой их калибровки и принципом регистрации нейтронов в детекторах можно ознакомиться в работах [16–19].

Научная аппаратура «Люлин-5» позволяет определять спектр линейной передачи энергии (ЛПЭ), потоки и мощности поглощенных доз от электронов, протонов и ТЗЧ на 3 глубинах в экваториальных каналах шарового фантома [11]. «Люлин-5» состоит из блока электроники и детекторного блока. Блок электроники представляет собой моноблок, состоящий из жидкокристаллического индикатора (ЖКИ) – дисплея и органов управления блоком. В памяти прибора запрограммировано 2 режима работы:

- стандартный режим измерения дозы и потока частиц с временным разрешением 90 с и циклом измерения выделившейся энергии и спектра ЛПЭ около 85 мин;
- режим ускоренных измерений – с временным разрешением 20 с и циклом измерения выделившейся энергии и спектра ЛПЭ около 15 мин. Данный режим измерений используется при пересечении МКС зоны Южно-Атлантической магнитной аномалии (ЮАМА).

Переключение между режимами осуществляется автоматически.

Внутри блока электроники находится карта памяти, которая возвращается для обработки данных на Землю в конце каждой экспедиции МКС.

Детекторный блок НА «Люлин-5» состоит из 3 полупроводниковых детекторов (обозначенных как D1, D2, D3), расположенных таким образом, что образуют телескоп заряженных частиц с чувствительной толщиной 360–370 мкм и диаметром

около 17,2 мм [20]. Позиция детекторов D1 и D2 внутри фантома (детектор D1 расположен на глубине 40 мм, D2 – на глубине 60 мм от поверхности фантома) соответствует примерной глубине расположения кровеносных органов в теле человека [5]. Детектор D3 располагается близко к центру фантома.

Спектр выделившейся энергии в детекторах D1 и D2 НА «Люлин-5» используется для определения спектра ЛПЭ в кремнии, который затем пересчитывается в ЛПЭ в воде и определяется коэффициент качества излучения $Q(L)$ для последующего определения дозового эквивалента H .

Эквивалентная доза от заряженных частиц H определяется с использованием НА «Люлин-5» из выражения, заданного в отчете МКРЗ [5]:

$$H = DQ_{av}(L), \quad (1)$$

где D – поглощенная доза в точке (Гр); $Q_{av}(L)$ – усредненный коэффициент качества излучения, зависящий от ЛПЭ L .

В свою очередь, коэффициент качества определяется из выражения:

$$Q_{av} = \int \frac{Q(L)D(L)dL}{D}, \quad (2)$$

где D – поглощенная доза (Гр); L – линейная передача энергии, кэВ/мкм.

Для определения эквивалентной амбиентной дозы, полученной с использованием спектрометрических детекторов НА «Баббл-дозиметр», применялась матрица отклика детекторов и конверсионные коэффициенты из отчета ICRP-74 [20]. Расположение детекторов НА «Баббл-дозиметр» и детекторного блока НА «Люлин-5» внутри шарового фантома показаны на рис. 1, 2.

Измерения проходили с мая по август 2013 г. в период экспедиций МКС-35/36 и с сентября 2014 г. по март 2015 г. в период экспедиций МКС-41/42. В течение всего этого периода в одном из экваториальных каналов шарового фантома находился детекторный блок НА «Люлин-5», а в трех других располагались дозиметрические или спектрометрические детекторы НА «Баббл-дозиметр».

Учитывая, что для определения энергетического спектра нейтронов в диапазоне энергии от 60 кэВ до 50 МэВ необходимы данные со всех 6 спектрометрических детекторов НА «Баббл-дозиметр», а свободных экваториальных каналов в шаровом фантоме было всего 3, измерения проводились по следующей схеме:

- в одном сеансе в фантоме размещалось 3 спектрометрических детектора из 6, измеряющие «нижнюю» область спектра (диапазон энергии от 60 кэВ до 600 кэВ);

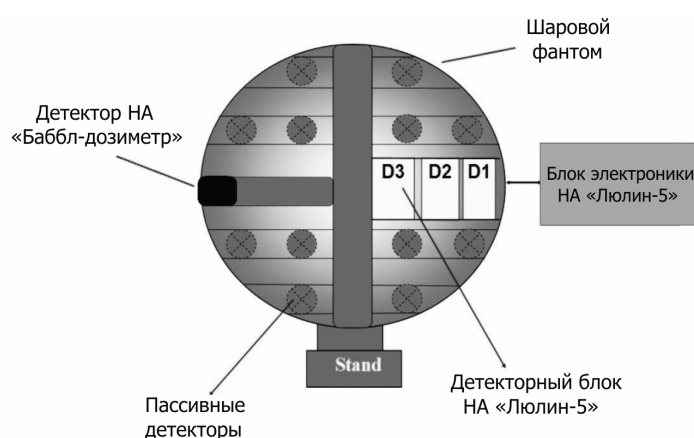


Рис. 1. Схематическое расположение детекторов внутри шарового фантома



Рис. 2. Расположение детекторного блока НА «Люлин-5» (слева) и детектора НА «Баббл-дозиметр» (справа) внутри шарового фантома в модуле «Рассвет» РС МКС

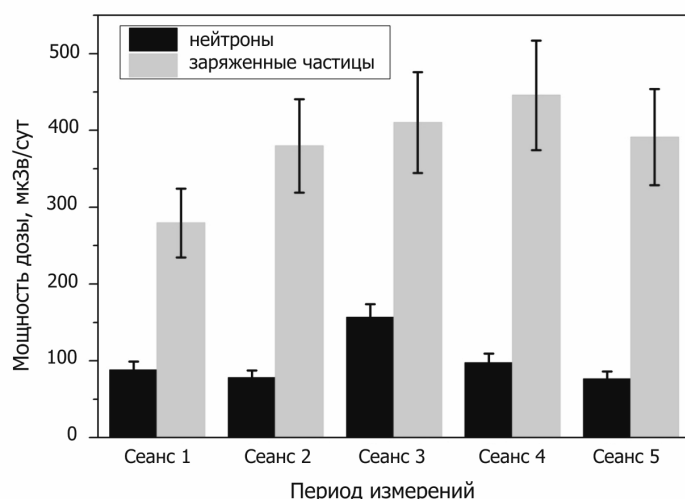


Рис. 3. Усредненные мощности дозы от заряженных частиц и нейтронного излучения внутри шарового фантома

— в следующем сеансе в фантоме размещались другие 3 спектрометрических детектора, измеряющие «верхнюю» область спектра (от 600 кэВ до 50 МэВ);

— по итогам 2 сеансов данные объединялись для определения спектра во всем исследуемом диапазоне энергии.

В каждом из сеансов измерений космонавт выполнял следующие операции:

- активацию детекторов;
- регистрацию каждого из детекторов в считывающем устройстве (пульте) посредством помещения детектора в «гнездо» для считывания информации с штрих-кодов и фиксации времени начала экспозиции;
- размещение детекторов в экваториальных каналах фантома и на его поверхности, фотографирование;
- экспозицию детекторов в течение примерно 7 сут;
- сбор детекторов и считывание информации в пульте;
- перевод детекторов в пассивное состояние хранения до следующего сеанса КЭ.

При этом, учитывая, что данные от спектрометрических детекторов за 2 сеанса измерений «сшивались» в один, фактически можно говорить о 4 полноценных сеансах измерений.

Информация о данных измерений по каждому из детекторов записывалась на карту памяти, которая по окончании каждой экспедиции возвращалась на Землю. Кроме того, для оперативного анализа информации данные считывались экипажем с дисплея пульта НА «Баббл-дозиметр» и передавались на Землю по каналам связи.

При этом в некоторых сеансах внутри и на поверхности фантома располагались также интегральные дозиметрические детекторы. Детекторный блок НА «Люлин-5» располагался в шаровом фантоме постоянно.

Интервал между сеансами не превышал 21 сут, в эти периоды не проводилась коррекция орбиты МКС, а также не было отмечено возмущений радиационных условий. Все эти факторы подтверждают, что внешние условия были одинаковы за время проведения измерений внутри фантома.

Результаты и обсуждение

На рис. 3 графически представлены среднесуточные мощности эквивалентной дозы от заряженных частиц и нейтронного излучения внутри шарового фантома.

Как видно из рисунка, вклад нейтронов в общую эквивалентную дозу колебался от 17

до 28 %. Отметим, что максимальный вклад нейтронов (28 %) был зарегистрирован в сеансе, когда использовались детекторы НА «Баббл-дозиметр» с истекающим рабочим ресурсом, что могло привести к увеличению погрешности измерений. Этот факт подтверждался наличием несхлопнувших пузырьков при инициализации детекторов (около 20 пузырьков).

Как было показано в работе [13], энергетический спектр нейтронного излучения внутри фантома «жестче», чем на его поверхности, и основной вклад в эквивалентную дозу вносят высокоэнергетические нейтроны с энергией выше 15 МэВ (от 86 до 100 %). Этот результат авторы объясняли эффективным замедлением низкоэнергетических нейтронов на атомах элементов, входящих в состав фантома, выведением их в более низкую часть спектра (менее 60 кэВ) и поглощением в веществе фантома. В то же время происходит дополнительная генерация вторичных нейтронов высоких энергий в веществе фантома.

Данные НА «Люлин-5» хорошо сходятся с ранее полученными результатами [21], в то же время мощность эквивалентной дозы от нейтронов внутри фантома в период МКС-35/36 и МКС-41/42 незначительно выше мощности эквивалентной дозы внутри фантома в период МКС-13/15. Суммарная мощность эквивалентной дозы от заряженных частиц и нейтронов подтверждает данные о средних мощностях дозы на МКС в диапазоне от 0,3 до 0,6 мкЗв/сут [22]. В то же время полученные данные хорошо согласуются с результатами измерений детекторов НА «Баббл-дозиметр» и американского тканеэквивалентного пропорционального счетчика ТЕРС [17], где сообщалось, что доза от нейтронов составляет около 30 % от полной дозы, определяемой данным прибором.

Выводы

Установлено, что вклад нейтронов в общую эквивалентную дозу составляет от 17 до 28 %, причем основной вклад вносят нейтроны с энергией выше 15 МэВ (вклад составляет от 86 до 100 %) [13]. Эти уникальные данные дополняют результаты совместных измерений американского тканеэквивалентного счетчика ТЕРС и детекторов НА «Баббл-дозиметр» в модуле «Звезда» РС МКС, где было установлено, что нейтроны вносят примерно 30 % в общую дозу внутри модулей МКС.

Результаты измерений эквивалентной дозы от заряженных частиц и нейтронного излучения внутри шарового фантома, полученные в период МКС-35/36 и МКС-41/42, хорошо согласуются с ранее полученными данными.

Для подтверждения полученных уникальных данных планируется продолжение одновременных

измерений внутри фантома с использованием НА «Люлин-5» и НА «Баббл-дозиметр» в период следующих экспедиций МКС.

Список литературы

1. Модель космоса / М.И. Панасюк, Л.С. Новиков, ред. 8-е изд. М., 2007.
Space model / M.I. Panasyuk, L.S. Novikov, eds. 8th ed. Moscow, 2007.
2. *Lyagushin V.I., Dudkin V.E., Potapov Yu.V., Sevastianov V.D.* Russian measurements of neutron energy spectra in the Mir orbital station // *Rad. Measurements*. 2001. № 33. P. 313–319.
3. *Лягушин В.И., Юшков Б.Ю.* Измерение потоков нейтронов альbedo атмосферы Земли и в Южно-Атлантической магнитной аномалии на орбитальной станции // *Изв. АН. Энергетика*. 2011. № 3. С. 75–81.
Lyagushin V.I., Yushkov B.Yu. Measurement of albedo neutrons flux from the Earth atmosphere and in the South-Atlantic anomaly onboard orbital station // *Izvestiya AN. Energetics*. 2011. № 3. P. 75–81.
4. *Armstrong T.W., Colborn B.L.* Predictions of secondary neutrons and their importance to radiation effects inside the International space station // *Rad. Measurements*. 2001. № 33. P. 229–234.
5. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. 1991.
6. *Badhwar G.D., Keith J.E., Cleghorn T.F.* Neutron measurements onboard the space shuttle // *Rad. Measurements*. 2001. № 33. P. 235–241.
7. *Шafirкин А.В., Григорьев Ю.Г.* Межпланетные и орбитальные полеты. Радиационный риск для космонавтов. Радиобиологическое обоснование. М., 2009.
Shafirkin A.V., Grigoryev Yu.G. Interplanetary and orbital space flights. Radiation risk for cosmonauts. Radiological validation. Moscow, 2009.
8. *Dudkin V.E. et al.* Differential neutron energy spectra measured on spacecraft in low earth orbit // *Nuclear Tracks Radiation Measurements*. 1990. V. 17. P. 87–91.
9. ГОСТ 25645.203-83. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Модель тела человека для расчета тканевой дозы. Госстандарт. М., 1984.
GOST 25645.203-83. Space crew radiation safety. The human body model for tissue dose calculation. Gosstandart. Moscow, 1984.
10. *Matthia D., Berger T., Reitz G.* Organ shielding and doses in low-earth orbit calculated for spherical and anthropomorphic phantoms // *Adv. in Space Res.* 2013. V. 52. P. 528–535.
11. *Semkova J., Koleva R., Maltchev St. et al.* Radiation measurements inside a human phantom aboard the International Space Station using Liulin-5 charged particle telescope // *Adv. in Space Res.* 2010. V. 45. P. 858–865.

12. Черных И.В., Лягушин В.И., Акатов Ю.А. и др. Результаты измерения дозы нейтронов внутри Российского сегмента Международной космической станции в эксперименте «Матрешка-Р» с использованием пузырьковых детекторов // *Авиакосм. и экол. мед.* 2010. Т. 44. № 3. С. 12–17.

Chernykh I.V., Lyagushin V.I., Akatov Yu.A. et al. Results of measuring neutron dose inside the Russian segment of the International Space Station using bubble detectors in experiment Matryoshka-R // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*. 2010. T. 44. № 3. P. 12–17.

13. Хулапко С.В., Лягушин В.И., Архангельский В.В. и др. Определение дозы и энергетического спектра нейтронов внутри и снаружи тканезквивалентного шарового фантома с использованием пузырьковых детекторов в эксперименте «Матрешка-Р» на Российском сегменте МКС // *Косм. техника и технологии*. 2015. Т. 2. № 9. С. 51–63.

Khulapko S.V., Lyagushin V.I., Arkhangelsky V.V. et al. Measurement of neutron dose and energy spectrum inside the tissue-equivalent spherical phantom and on its surface using bubble detectors during «Matryoshka-R» experiment on the Russian segment of the ISS // *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*. 2015. V. 2. № 9. P. 51–63.

14. ГОСТ 18622-79. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. Химический состав тканезквивалентного вещества. Госстандарт. М., 1980.

GOST 18622-79. Interaction of ionizing radiation with matter. Chemical composition of the tissue-equivalent matter. Gosstandart. Moscow, 1980.

15. Карцев И.С., Акатов Ю.А., Еременко В.Г. и др. Шаровой фантом для исследования радиационной обстановки в космическом пространстве. Конструктивные особенности // *Ядерные измерительно-информационные технологии*. 2005. Т. 4. № 16. С. 36–45.

Kartsev I.S., Akatov Yu.A., Yeremenko V.G. et al. Spherical phantom for research of the radiation environment in space. The constructive features // *Yadernye izmeritelno-informatsionnye tekhnologii*. 2005. V. 4. № 16. P. 36–45.

16. Хулапко С.В., Лягушин В.И., Архангельский В.В. и др. Результаты измерения дозы и энергетического спектра нейтронов внутри Российского сегмента Международной космической станции в эксперименте «Матрешка-Р» с использованием пузырьковых детекторов в период экспедиций МКС-24–34 // *Авиакосм. и экол. мед.* 2014. Т. 48. № 2. С. 52–56.

Khulapko S.V., Lyagushin V.I., Arkhangelsky V.V. et al. Results of measuring neutrons doses and energy spectra inside Russian segment of ISS in experiment «Matryoshka-R» using bubble detectors during the ISS-24–34 missions // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*. 2014. V. 48. № 2. P. 52–56.

17. Smith M.B., Khulapko S., Andrews H.R. et al. Bubble-detector measurements in the Russian segment of the International Space Station during 2009–12 // *Radiation Protection Dosimetry*. 2014. V. 1. P. 1–13.

18. Ing H. Neutron measurement using bubble detectors - terrestrial and space // *Rad. Measurements*. 2001. V. 33. P. 275–286.

19. Smith M.B., Akatov Yu., Andrews H.R. et al. Measurements of the neutron dose and energy spectrum on the International space station during expeditions ISS-16 to ISS-21 // *Radiation Protection Dosimetry*. 2013. V. 153. № 4. P. 509–533.

20. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74. 1996.

21. Semkova J., Maltchev St., Bankov N. et al. Depth dose measurements with the Liulin-5 experiment inside the spherical phantom of the Matroshka-R project onboard the International Space Station // *Adv. in Space Res.* 2012. V. 49. № 3. P. 471–478.

22. Методические указания МУ 2.6.1. 44-03-2004 Ограничение облучения космонавтов при околоземных космических полетах. М., 2004

Methodological instructive regulations MU 2.6.1. 44-03-2004 Cosmonauts irradiation limitations during the low Earth orbit flights. Moscow, 2004.

Поступила 20.07.2015

COMPARISON OF DOSE EQUIVALENTS FROM CHARGED PARTICLES AND NEUTRONS INSIDE THE SPHERICAL TISSUE-EQUIVALENT PHANTOM ON THE RUSSIAN SEGMENT OF THE INTERNATIONAL SPACE STATION

Khulapko S.V., Lyagushin V.I., Arkhangelsky V.V., Shurshakov V.A., Nikolaev I.V., Semkova J., Smith M., Machrafi R.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2016. V. 50. № 2. P. 47–52

Dose equivalents from charged particles and neutrons measured with Lyulin-5 and a bubble-dosimeter inside the spherical tissue-equivalent phantom were compared within Russian space experiment Matryoshka-R. Measurements were made during main the International space station (the ISS) missions 35/36 (March – September, 2013) and 41/42 (September, 2014 – March, 2015) when the phantom spent time in the Small Research Module (MIM1) of the ISS RS. The daily average rate of neutron dose equivalent in phantom tunnels varies between 77 ± 13 to $157 \pm 25 \mu\text{Sv/d}$ constituting 17 to 28 % of full dose.

Key words: bubble-dosimeter, Lyulin-5, Matryoshka-R, neutron radiation, dose equivalent, spherical phantom, radiation safety.