



УДК 539.1.08, 53.087.44

КОНТРОЛЬ ДОЗЫ И СПЕКТРА НЕЙТРОНОВ НА ВЫСОТАХ АВИАПЕРЕЛЕТОВ

Рябева Е.В.¹, Идалов В.А.¹, Минлигареев В.Т.², Кравченко В.Л.²¹ *Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ»*,² *Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова*

В работе рассмотрена проблема учета доз нейтронной компоненты на стандартных высотах авиаперелетов. Предложена модель многомодульного детектора нейтронов для проведения экспериментов по определению спектра нейтронов на борту самолета. Показана возможность получения информации о спектральных характеристиках потоков нейтронов. Такие детекторы могут применяться для исследований параметров космической погоды (учета доз радиации на высотах авиаперелетов) на борту самолетов специальной авиации, в частности, на самолете ЯК-42Д «Росгидромет».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ДОЗА РАДИАЦИИ, ВЫСОТЫ АВИАПЕРЕЛЕТОВ, ДОЗИМЕТРИЯ, СПЕКТРОМЕТРИЯ НЕЙТРОНОВ, ТРАНСПОЛЯРНЫЕ ПЕРЕЛЕТЫ

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время количества рейсов гражданской авиации, совершающей трансполярные перелеты превышает 15 тыс. полетов в год и продолжает увеличиваться [1]. Основные направления трансполярных маршрутов показаны на рис. 1.

Во время очень сильных и экстремальных протонных событий класса S4, S5 трассы авиаперелетов над полярными регионами подвергаются воздействию высоких уровней радиации, что может привести к опасным последствиям как для экипажа (многократно попадающего в эту зону), так и для пассажиров, нормативы разового облучения для которых могут быть превышены в случае очень сильных и экстремальных протонных событий. Следует отметить, что в соответствии с нормативными документами уровень облучения для населения не должен превышать 1 мЗв/год [2]. Велико также влияние гелиогеофизических явлений (космической погоды и др.) на авиационную технику, связь и позиционирование.

Мощность дозы при трансполярных перелетах может увеличиваться более чем в 15 раз по сравнению с перелетами в экваториальных областях. Повышение мощности дозы происходит за счет увеличения количества первичного излучения (в основном галактических и солнечных космических лучей - ГКЛ и СКЛ) в приполярных областях. Кроме того, существенное увеличение первичных частиц возможно, как следствие солнечных вспышек и/или других космических событий. При солнечных вспышках мощность дозы облучения может превышать фоновую на 4-5 и более порядков.

В настоящее время учет доз радиации проводится гамма-дозиметрами и радиометрами с энергетическим диапазоном до 3 МэВ, и не учитывают нейтронную компоненту. Поэтому важно проводить дозиметрический контроль по мощности дозы гамма-излучения, а также по мощности дозы нейтронного излучения и спектрального состава на стандартных высотах авиаперелетов.



Рис. 1. Основные направления трансполярных маршрутов.

Таким образом актуальность контроля радиации, как части космической погоды на высотах авиaperелетов, возрастает с каждым годом. Вклад нейтронной компоненты в общую дозу для экипажей и пассажиров авиалайнеров на высотах 10000-12000 м по разным оценкам может достигать от 30 до 80 % в зависимости от высоты и широт, на которых совершается полет [3], [4].

В соответствии с основным направлением плана мероприятий ВМО и ИКАО по координации деятельности, связанной с космической погодой, созданы глобальные и региональные центры космической погоды: глобальный центр космической погоды в США, геоаэронавигационный консорциум с участием Канады, Австралии, Японии и Франции; консорциум стран Евросоюза (Австрия, Бельгия, Италия, Кипр, Нидерланды, Польша, Соединенное Королевство Великобритании); консорциум России и Китая. В Российской Федерации, основанный в 2018 г. региональный Центр космической погоды для обеспечения международной аэронавигации, базируется в Институте прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова (ФГБУ «ИПГ»). В настоящее время ФГБУ «ИПГ» совместно с Национальным центром космической погоды Китая ведет подготовку к подаче заявки на утверждение его новым глобальным центром космической погоды.

Все глобальные и региональные центры космической погоды в режиме реального времени будут уделять особое внимание проявлениям солнечной активности, предупреждать об опасных гелиогеофизических явлениях (ОГЯ) (протонных событиях, солнечных вспышках и др.), которые могут потенциально оказывать влияние на связанную с воздушным транспортом высокочастотную связь, навигацию, позиционирование, а также фиксировать уровни радиации на высотах авиaperелетов.

Контроль радиационных потоков проводится по эмпирическим моделям NAIRAS, EPCARD, PCAIRE, КРАТ и др. Однако необходима периодическая верификация данных моделей с натурными измерениями. Так в 70-х годах на борту экспериментального ТУ-144 в СССР проводились такие эксперименты. Аналогичные исследования в более позднее время были проведены авиакомпаниями Lufthansa, Pan American, Czech Airlines .

Для обеспечения мониторинга нейтронных потоков важно исследование спектральных характеристик нейтронов, т.к. вклад в суммарную дозу существенно зависит от их энергии. При разработке аппаратуры для спектрометрии нейтронов, устанавливаемой на борту самолета, необходимо учитывать ограничения в геометрических размерах устройства и суммарное энергопотребление приборов.

На высотах от 9000 до 12000 м, где проходят эшелоны существенной части современного парка гражданских самолетов, используемых на внутренних и международных рейсах, уровень облучения даже при спокойной геофизической обстановке, остается в десятки раз выше, чем на поверхности

Земли (фоновые уровни 3–40 мкЗв/час экстремальные, во время сильных солнечных вспышек порядка 1 мЗв/час). Для сравнения люди, живущие на уровне моря, получают в среднем эквивалентную дозу от космического излучения около 0,3 мЗв/год или примерно 0,03 мкЗв/ч [5].

2. НЕЙТРОННЫЙ ФОН НА ВЫСОТАХ АВИАПЕРЕЛЕТОВ

Как уже отмечалось, при авиалетах в суммарной радиационной дозе необходимо рассматривать вклад от нейтронного фона.

Вторичные атмосферные нейтроны рождаются в атмосфере под воздействием СКЛ и ГКЛ. После возникновения нейтроны проходят стадию замедления и приобретают спектр, характерный вид которого представлен на рис. 2 [6].

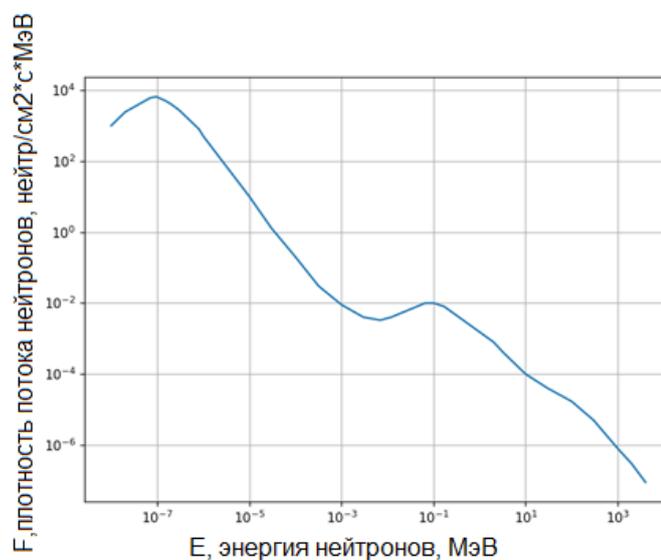


Рис. 2. Спектр нейтронов в атмосфере Земли на уровне моря для широты 44°.

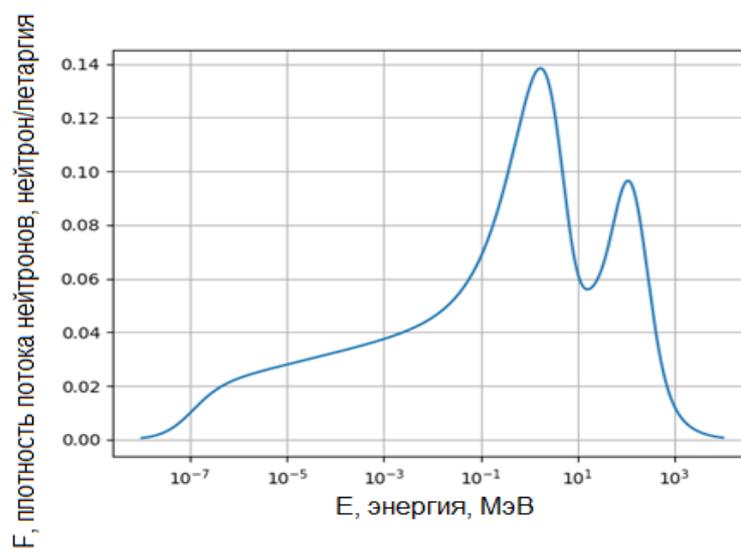


Рис. 3 Спектр нейтронов на борту самолета.

Плотность потока нейтронов на борту самолета будет сильно зависеть от высоты и широты полета. При этом, на высотах полета от 10000 до 12000 м могут рождаться вторичные нейтроны, появляющиеся в результате воздействия протонов ГКЛ и СКЛ на конструкцию летательного аппарата, количество которых и их спектральный состав сильно зависят от химического состава конструкционных материалов и массы самолета. Т.к. вторичные нейтроны рождаются непосредственно в самой конструкции, то их количество напрямую связано с числом индуцирующих их рождение адронов, находящихся в атмосфере. Поэтому количество таких нейтронов может существенно увеличиваться, например, во время геомагнитных возмущений и/или солнечных вспышек. Спектр нейтронов на борту самолета показан на рис. 3 [7].

Как видно из приведенного спектра, при регистрации нейтронов необходимо охватить большой диапазон по энергиям: от тепловых до 10^3 МэВ. Такой большой диапазон измерений является достаточно сложной задачей. Также надо помнить об ограничениях по массе, габаритам и энергоемкости регистрирующей аппаратуры.

3. АППАРАТУРА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРОНОВ НА БОРТУ САМОЛЕТА

Мониторинг радиационной дозы и мониторинг вклада нейтронной компоненты проводился и проводится на гражданских самолетах и специальных самолетах-лабораториях. За последнее время зарубежными авторами был опубликован ряд работ по мониторингу нейтронных компонент [7–10].

Разрабатываются и используются специальные спектрометры на основе известных сфер Боннера. Детекторы данного типа содержат гелиевые счетчики (^3He) внутри полиэтиленовой сферы и используются для фиксирования спектра нейтронов на борту самолета [11]. Основным недостатком спектрометров такого вида являются их размеры – большая сфера имеет диаметр 12 дюймов. Вторым недостатком считается их многокомпонентность – в состав спектрометра входят 10 сфер.

Кроме того, надо учитывать большие, иногда выше заявленных, погрешности при дозиметрии нейтронов на борту самолета с использованием индивидуальных, прямопоказывающих нейтронных дозиметров. Как следует из работы [12], погрешности дозиметров сильно повышаются и выходят за пределы заявленных, если энергии нейтронов превышают 20 МэВ.

В настоящее время проводятся измерения, в том числе и нейтронные, с использованием специального радиометрического комплекса на борту экспериментального самолета ЯК-42 Д «Росгидромет» [13]. В состав аппаратуры для анализа нейтронов входит радиометр нейтронов LB123, с заявленным диапазоном энергий по нейтронам до 20 МэВ. Однако следует отметить, что чувствительность LB123 к нейтронам с энергией выше 20 МэВ ниже заявленной величины 40%, а их спектр на борту самолета перемещается в область более высокоэнергетических нейтронов, т.е. с энергией много большей, чем 20 МэВ. Поэтому существует необходимость в разработке детектора высокоэнергетических нейтронов с возможностью восстановления спектральных характеристик их потоков.

4. ОБЩАЯ КОНСТРУКЦИЯ ПРЕДЛАГАЕМОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ

Предлагаемый в рамках данной работы детектор нейтронов имеет кубическую форму и состоит из n^3 одинаковых модулей, рис. 4. Каждый модуль представляет собой сцинтилляционный детектор быстрых нейтронов – водородосодержащий пластик EJ-212 [14]. Одну из граней каждого модуля покрывает сетка из кремниевых фотоумножителей (SiPM). Пластик выступает материалом, в котором происходит одновременно и регистрация, и замедление нейтронов. Каждый модуль имеет свою зависимость эффективности регистрации от энергии нейтронов. Имея показания для каждого отдельного модуля, можно восстановить информацию о плотности потока и спектральных характеристиках нейтронов.

К плюсам такого детектора можно отнести: небольшие размеры, массу и энергопотребление; чувствительность к нейтронам в диапазоне энергий от 10^{-1} до 10^2 МэВ, простоту конструкции, возможность одновременного восстановления спектральных характеристик в режиме реального времени.

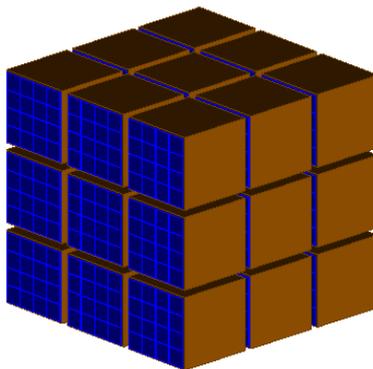


Рис. 4. Общая конструкция детектора модульного типа с сеткой кремниевых фотоумножителей (SiPM).

Можно сформулировать минимальные требования для оптимизации под поставленную задачу геометрических размеров детектора:

- энергетический диапазон от 10^{-1} до 10^2 МэВ;
- детектор должен иметь наибольшую эффективность для спектра нейтронов на борту самолета, т.е. обладать высокой эффективностью регистрации нейтронов;
- для успешного восстановления спектральных характеристик необходимо, чтобы максимумы эффективности для разных модулей были максимально далеко разнесены друг от друга.

В данной работе проводится математическое моделирование детектора – спектрометра нейтронов. Но на высотах перелетов будет присутствовать и другое ионизирующее излучение. Существенный вклад в сигнал предлагаемого детектора может внести протонная компонента. Для разделения протонной и нейтронной компоненты можно применить, например, детектор протонов и схему совпадений, но это выходит за рамки данной статьи и авторы не рассматривают предложения по детектору протонов.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА РЕГИСТРАЦИИ ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ

Проведено математическое моделирование средствами Geant 4 10.4 [15], [16]. Для упрощения модели, конструкционные элементы SiPM не учитывались. Для учета нейтронного события в детекторе рассматривались события с выделением энергии больше порогового значения.

Первой задачей моделирования был расчет эффективности при регистрации нейтронов на борту самолета. Для такой модели использовался спектр нейтронов, представленный на рисунке 3. Загрузка детектора бралась примерно, соответствующей нагрузке на борту самолета. Результат моделирования показал эффективность регистрации описанных нейтронов не ниже чем 0.3 импульса/нейтронов.

Далее был рассчитан модельный отклик детектора на нейтроны различных энергетических групп и на нейтроны специфических спектров, которые могут воздействовать на детектор на борту самолета (спектры на рисунках 2 и 3). На рисунках 5 и 6 приведено количество отсчетов в ячейке детектора в зависимости от выделенной энергии. Анализируя рисунки 5 и 6 можно сказать, что отклики на разные спектры нейтронов сильно отличаются, что говорит об избирательности детектора к различным энергиям нейтронов. После проведения калибровки возможно применение детектора для определения спектральных характеристик потоков нейтронов.

В обоих вариантах запускалось одинаковое количество событий. Следует отметить, что при регистрации возникает проблема с реакцией захвата нейтрона ядром водорода с испусканием гамма-кванта и образованием ядра отдачи дейтрона (1.3 кэВ). Энергия гамма-кванта составляет 2.1 МэВ и с увеличением толщины модуля увеличивается вероятность регистрации этого гамма-кванта.

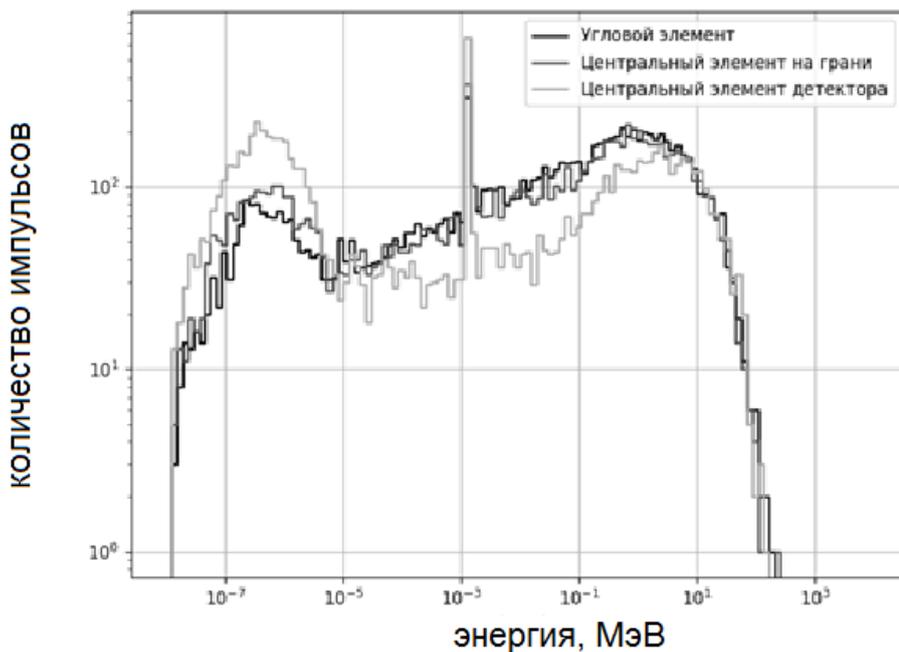


Рис. 5. Количество отсчетов в единичном элементе детектора (условное обозначение положения элемента указано в правом верхнем углу) при моделировании облучения изотропным источником спектра, приведенного на рис. 2 (число нейтронов 10^8).

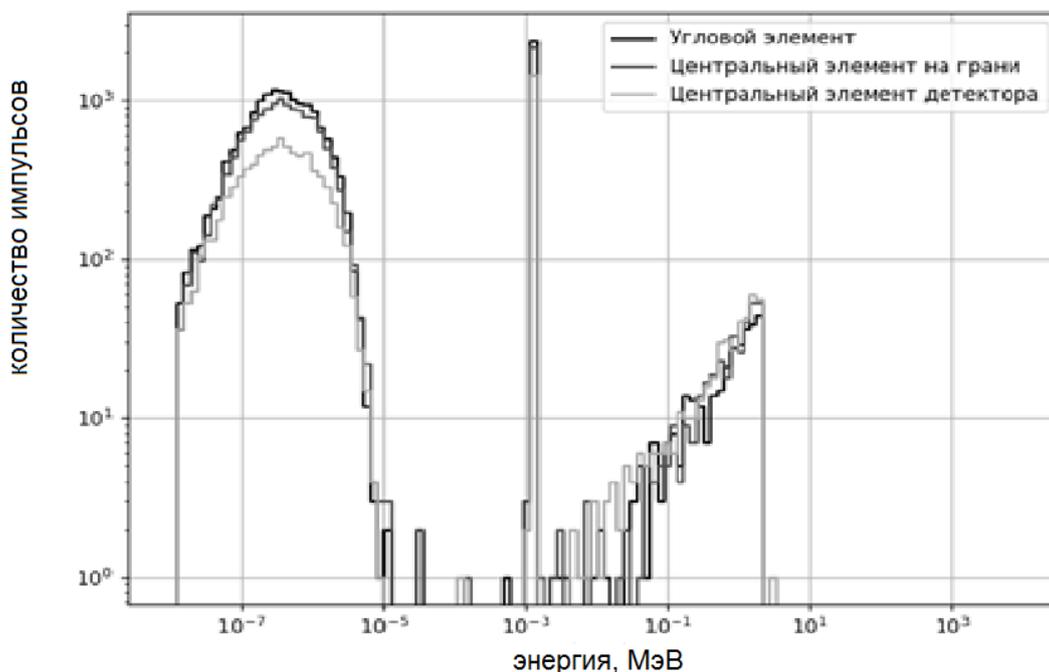


Рис. 6. Количество отсчетов в единичном элементе детектора (условное обозначение положения элемента указано в правом верхнем углу) при моделировании облучения изотропным источником спектра, приведенного на рис. 3 (число нейтронов 10^8).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе показана необходимость периодической верификации эмпирических моделей распределения доз радиации на высотах авиаперелетов экспериментальным методом, предложена модель многомодульного детектора на кремниевых фотоумножителях для контроля вклада нейтронной составляющей.

Смоделированная эффективность регистрации спектра нейтронов для одного модуля составила не менее 0.3 имп./нейтрон. Полученный уровень эффективности показал возможность использования предлагаемого детектора для регистрации нейтронов на борту самолета.

Предлагаемый детектор нейтронов также может быть использован для оценки спектральных характеристик потоков нейтронов в энергетическом диапазоне от 10^{-1} до 10^2 МэВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Морозова М.А., Лапшин В.Б., Доренский С.В., Сыроешкин А.В. Дозиметрия при авиаперелетах // Гелиогеофизические исследования. Вып. 10. С. 45-92. 2014.
2. СанПиН 2.6.1.2523-09 "Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)", 2009.
3. Poje M., Vuković B., Radolić V., Miklavčić I. Neutron Radiation Measurements on Several International Flights // Health Physics, V. 108, N 3. March 2015. pp. 344–350.
4. Доренский С.В., Минлигареев В.Т., Сыроешкин А.В. Определение суммарной мощности эквивалентной дозы, полученной пассажирами и членами экипажей при авиаперелетах // Аннотации докладов НИЯУ МИФИ. Москва. том. 1. с. 176.
5. Лапшин В.Б., Сыроешкин А.В., Буров В.А. Космическая погода и авиаперевозки // Мир измерений. N. 2. С. 11-16. 2013.
6. Hess W.N., Chupp E.L. Cosmic Ray Neutron Energy Spectrum // Physical Review. V. 116. P. 445-457. 1959.
7. Yasuda H., Lee J., Yajima K., Hwang J.A., Sakai K. Measurements of cosmic-ray neutron dose on board a polar route flight from New-York to Seoul // Radiation Protection Dosimetry, Vol. 146, No. 1-3, 2011. pp. 213-216.
8. Bartlett D.T., Hager L.G., Irvine D., Bagshaw M. Measurements on concorde of the cosmic radiation field at aviation altitudes // Radiation Protection Dosimetry, Vol. 91, No. 4, 2000. pp. 365-376.
9. Ferrari A., Pelliccioni M., Rancati T. Calculation of the radiation environment caused by galactic cosmic rays for determining air crew exposure // Radiation Protection Dosimetry, Vol. 93, No. 2, 2001. pp. 101-114.
10. Bottollier-Depois J.F., Biau A., Blanchard P. Assessing exposure to cosmic radiation aboard aircraft: the SIEVERT system // Radioprotection, Vol. 38, No. 3, 2003. pp. 357-366.
11. Cheminet A., Lacoste V., Gressier V., Hubert G., Martina A. Characterization of the IRSN neutron multisphere spectrometer (HERMEIS) at European standard calibration fields // 2nd International workshop on fast neutron detectors and applications. Ein Gedi, Israel. 2011.
12. Алексеев А.Г., Курякова В., Крючков В.П. Метрологические вопросы использования индивидуальных дозиметров нейтронов ДВН-А-01 и ДВНГ-01 // ИФВЭ, Протвино, Препринт 2004.
13. Вакуловский С.М., Андреев Ф.А., Епифанов А.О., Мальшев В.А., Новиченков А.В. Радиометрический комплекс в составе самолета-лаборатории ЯК-42Д "Росгидромет" // АНРИ, №1(80), 2015. с.32-40.
14. General Purpose EJ-200, EJ-204, EJ-208, EJ-212 [Электронный ресурс] // ELJEN TECHNOLOGY: [сайт]. [2016]. URL: <https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212> (дата обращения: 13.Июнь.2018).
15. Agostinelli S., Allison J., Amako K., Apostolakis J., Araujo H. Geant4 - a simulation toolkit // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Vol. 506, No. 3, July 2003. pp. 250-303.
16. Allison J., Amako K., Apostolakis J., Arce P., Asai M. Recent developments in Geant4 // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Vol. 835, November 2016. pp. 186-225.

MONITORING THE DOSE AND SPECTRUM OF NEUTRONS AT ALTITUDES OF FLIGHTS

Ryabeva E.V., Idalov V.A., Minligareev V.T., Kravchenok V.L.

The paper considers the problem of accounting doses of the neutron component at standard altitudes of air travel. A model of a multi-module neutron detector is proposed for conducting experiments to determine the neutron spectrum on board an aircraft. The possibility of obtaining information on the spectral characteristics of neutron fluxes is shown. Such detectors can be used to study the parameters of space weather (radiation dose accounting) during air travel on board special aircraft, in particular the Yak-42D Roshydromet

KEYWORDS: RADIATION DOSE, FLIGHT ALTITUDES, DOSIMETRY, NEUTRON SPECTROMETRY, TRANSPOLAR FLIGHTS