

УДК 621.039.76:629.735.45

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ОЦЕНКИ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ ЭКИПАЖЕЙ КОММЕРЧЕСКИХ АВИАПЕРЕЛЕТОВ

Хаджинова К.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Цявловская Н.В. – магистр техн. наук, ст. преподаватель кафедры ИПиЭ

Аннотация. Рассмотрено влияние космического излучения на экипажи коммерческих авиAPERелетов и важность его мониторинга. Приведены рекомендации *ICRP* и *МКРЗ* по учету этого излучения. Представлены результаты расчетов дозы облучения, используя ПО *CARI-7*, подчеркивающие значимость точных оценок для безопасности полетов.

Ключевые слова: космическое излучение, экипажи коммерческих самолетов, дозиметрический мониторинг, *ICRP*, *МКРЗ*, программное обеспечение, *CARI-7*, по, эффективная доза, амбиентный эквивалент, солнечная активность, геомагнитные условия, галактические космические лучи, солнечно-протонные штормы, безопасность полетов.

Введение. Экипажи коммерческих самолётов подвергаются атмосферному излучению от галактических космических лучей (ГКЛ) и солнечных протонных штормов [1]. В 60-й публикации *ICRP* подчёркивается необходимость учёта космического излучения в профессиональном облучении, а в 132-й публикации *МКРЗ* рекомендовано использовать проверенные программы для мониторинга доз.

Космические лучи – это поток высокоэнергетических частиц, возникающих вне солнечной системы или во время солнечных вспышек [2-4]. Около 98% частиц ГКЛ составляют ядра атомов и электроны, из которых 85–90% – протоны, а 9–14% – ядра гелия. Магнитосфера Земли снижает количество низкоэнергетических частиц, а жёсткость геомагнитной отсечки меняется со временем. Интенсивность космического излучения на Земле обратно коррелирует с солнечной активностью.

Взаимодействуя с атмосферой, космические лучи создают вторичное излучение, включающее протоны, нейтроны, фотоны и мюоны. На высотах коммерческих перелётов основной вклад в дозу экипажа вносят ГКЛ. Спектр вторичного излучения зависит от глубины атмосферы, жёсткости геомагнитной отсечки и солнечной активности.

Основная часть. Существуют различные программы для расчёта дозы космического излучения, получаемой экипажем во время полёта. Некоторые из них используют симуляцию атмосферного излучения методом Монте-Карло, в то время как другие основаны на аналитических моделях или измеренных данных. Программы, использующие Монте-Карло симуляцию, включают *AVIDOS*, *CARI-7* и *EPCARD* [5-7]. *CARI-6* и *FREE* применяют аналитические методы, а *FDOScalc* и *PCAIRE* основываются на измеренных данных. Из-за доступности и простоты использования программы *CARI-7* будет рассмотрен один из способов расчёта дозы.

CARI (*Civil Aeromedical Research Institute*) – это программы, разработанные Институтом медицины в гражданской авиации США. Существует две версии: *CARI-7* и *CARI-7A*. Первая версия, выпущенная в 2014 году, разделила программу на две ветви из-за отзывов пользователей: *CARI-7A* сохранила большинство опций, а *CARI-7* сократила набор настроек. *CARI-7* позволяет оценить эффективную дозу и амбиентный эквивалент дозы $H^*(10)$ за перелёт на высотах до 100 км, используя данные атмосферного излучения, полученные с помощью метода *MCNPX* версии 2.7.0.

Моделирование прохождения излучения через атмосферу проводилось для частиц космического излучения с энергиями от 1 МэВ до 1 ТэВ. В *MCNPX* отслеживались мюоны, фотоны, электроны и протоны, с сохранением показателей флюенса атмосферного

излучения для всех частиц, кроме каонов и нейтрино. Спектры частиц преобразовывались в дозы с использованием коэффициентов преобразования флюенса, что позволило создать базу данных для моделей ГКЛ. В *CARI-7A* версий 4.1.3 и 4.2.0 доступны модели модуляции ГКЛ: *ISO 15390:2004* с солнечной модуляцией на основе числа Вольфа, модель с гелиоцентрическим потенциалом, а также модели *Badhwar-O'Neill* 2011 и 2014 годов [8].

Программа учитывает влияние солнечной активности и геомагнитного поля на уровни галактического космического излучения для выбранной даты. Облучение от солнечно-протонных штормов не учитывается напрямую, но влияние геомагнитных бурь корректируется на основе данных *Kp* индексов [6-9]. *CARI-7* соответствует требованиям регулирующих органов ряда стран, включая Великобританию, Швейцарию и Финляндию [10, 11]. В руководстве *ICAO CARI* описывается как «проверенная на практике» [12]. Существует упоминание об использовании *CARI-6* для оценки дозы облучения в странах ЕС, таких как Бельгия, Чехия, Дания, Ирландия, Италия, Литва, Словения, Швеция и Нидерланды [13]. Один из способов проверки программы *CARI* – сравнение её оценки дозы с результатами измерений. В статье «*CARI-7A: development and validation*» приводится сравнение с тканеэквивалентным пропорциональным счётчиком «*HAWK*», где отклонение *CARI-7A* составило от -14% до +34%, со средним значением +5% [14-16].

Прибор «*HAWK*» предназначен для измерения общей дозы смешанного излучения в космосе и во время коммерческих авиаперелётов, включая поглощённую и эквивалентную дозу. Отклонение мощности амбиентного эквивалента дозы от значений *ICRU* в среднем составило +5% (от -5% до +14%). Для сравнений использовалась модель *Badhwar-O'Neill* 2011 года. Программа *CARI-7*, соответствующая требованиям дозиметрического контроля, использует данные атмосферного излучения, полученные с помощью *MCNPX* версии 2.7.0, и требует информации о времени вылета, траектории полёта и солнечной активности. Расчёты проводились с использованием *CARI-7* версии 4.1.3, но из-за недостатка данных результаты являются приблизительными. Профили перелётов представлены в таблицах (1-4), а значения не учитывают влияние корпуса самолёта, что может снизить мощность амбиентного эквивалента дозы до 24%.

Сравнение показаний дозиметра *МКС-АТ6130* с результатами *CARI-7* для фотонного излучения выявило отклонения от 1449% до 2192%. Это может быть связано с измерениями вне рабочего диапазона прибора (50–3000 кэВ), влиянием конструкции самолёта и воздействием не фотонного излучения.

Расчёты *CARI-7* были приблизительными из-за отсутствия точных данных о времени вылета и траектории полёта. Программа остаётся надёжным инструментом для оценки радиационного воздействия, но достоверность показаний *МКС-АТ6130* вызывает сомнения, что подчёркивает важность использования проверенных методов и оборудования. Используемые профили перелета представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Используемые профили перелета

Перелёт	Аэропорт вылета	Аэропорт назначения	Время полёта (мин)	Время набора высоты (мин)	Время снижения (мин)	Маршрутная высота (фут)
Вена – Минск	<i>LOWW</i>	<i>UMMS</i>	91	15	29	36000
Минск – Вена	<i>UMMS</i>	<i>LOWW</i>	91	15	29	36000
Минск – Санкт-Петербург	<i>UMMS</i>	<i>ULLI</i>	64	17	20	32000
Санкт-Петербург – Минск	<i>ULLI</i>	<i>UMMS</i>	64	17	20	32000
Мурманск – Санкт-Петербург	<i>ULLI</i>	<i>ULMM</i>	86	15	23	36000

Направление «Электронные системы и технологии»

Оценки средних месячных доз, рассчитанных программой *CARI-7*, представлены в таблицах 2 и 3. Эти значения не учитывают влияние корпуса самолёта, которое может снизить мощность амбиентного эквивалента дозы до 24% на высоте 10.7 км.

Таблица 2 – Общая доза за перелёт

Перелёт	Месяц перелёта	Аэропорт вылета	Аэропорт назначения	Средняя за месяц перелёта доза за перелёт, $H^*(10)$ (мкЗв)
Вена – Минск	10/2019	LOWW	UMMS	5.8418
Минск – Вена	10/2019	UMMS	LOWW	5.8814
Минск – Санкт-Петербург	10/2018	UMMS	ULLI	3.2392
Санкт-Петербург – Минск	10/2018	ULLI	UMMS	3.2349
Мурманск – Санкт-Петербург	10/2018	ULLI	ULMM	7.4165

Таблица 3 – Относительный вклад различных излучений в общую дозу

Перелёт	Нейтронное	Протонное	Электронное	Фотонное	Мюонное	Позитронное
Вена – Минск	58.07%	14.33%	14.56%	4.75%	3.38%	3.24%
Минск – Вена	58.14%	14.36%	14.49%	4.73%	3.36%	3.22%
Минск – Санкт-Петербург	62.91%	13.32%	12.12%	4.19%	3.39%	2.60%
Санкт-Петербург – Минск	62.88%	13.32%	12.14%	4.19%	3.40%	2.61%
Мурманск – Санкт-Петербург	62.41%	14.56%	11.81%	3.96%	2.68%	2.61%

Сравнение показаний *MKS-AT6130* с результатами *CARI-7* для фотонного излучения показало отклонения от 1449% до 2192%, что может быть связано с ограничениями прибора и влиянием конструкции самолёта, сравнения представлены в таблице 4. Различия между показаниями дозиметра и полной дозой *CARI-7* составили 5–35%.

Таблица 4 – сравнение измерений *MKS-AT6130* с результатами *CARI-7*

$H^*(10)$ мкЗв					
Перелёт	Нд – показания <i>MKS-AT6130</i>	Нф – результаты <i>CARI-7</i> для фотонного излучения	Н – результаты <i>CARI-7</i> для всего излучения	(Нд – Нф)/Нф	(Нд – Н)/Н
Вена – Минск	6.36	0.27753	5.8418	2191.64%	8.87%
Минск – Вена	6.20	0.27822	5.8814	2128.45%	5.42%
Минск – Санкт-Петербург	2.10	0.13558	3.2392	1448.90%	-35.17%
Санкт-Петербург – Минск	2.64	0.13557	3.2349	1847.33%	-18.39%
Мурманск – Санкт-Петербург	5.68	0.29364	7.4165	1834.34%	-23.41%

Расчёты доз для шести перелётов с использованием *CARI-7* были приблизительными из-за недостатка данных. Результаты дозиметра *MKS-AT6130* вызывают сомнения, что подчеркивает важность использования проверенного оборудования и программного обеспечения. Авиаперелёты связаны с повышенным уровнем радиации из-за галактических космических лучей и солнечных штормов. Программа *CARI-7*, несмотря на ограничения, остаётся надёжным инструментом для оценки доз.

Заключение. Для повышения точности необходимы дальнейшие исследования, совершенствование методов измерения и разработка более точных моделей расчёта радиационного воздействия. Это особенно важно для защиты экипажей и пассажиров, регулярно подвергающихся воздействию атмосферного излучения.

Список литературы

1. ICRP (2016). *International Commission on Radiological Protection. Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation. ICRP Publication 132. Annals of the ICRP*, 45(1), 1–48.
2. ICRU (2010). *International Commission on Radiation Units and Measurements. Reference Data for the Validation of Doses from Cosmic-Radiation Exposure of Aircraft Crew. ICRU Report 84, Journal of the ICRU* 10(2).
3. Мурзин В.С. *Астрофизика космических лучей: Учебное пособие для вузов / В.С. Мурзин. Москва : Университетская книга, Логос, 2007. 488 с.*
4. ICRP (2013). *International Commission on Radiological Protection. Assessment of Radiation Exposure of Astronauts in Space. ICRP Publication 123. Annals of the ICRP*, 42(4).
5. EC (2012). *European Commission. Comparison of Codes Assessing Radiation Exposure of Aircraft Crew due to Cosmic Radiation. Report Radiation Protection 173 of the European Radiation Dosimetry Group, WG5 (European Commission, Luxembourg).*
6. Copeland, K. (2021). *CARI-7 Documentation: User's Guide. Federal Aviation Administration Office of Aerospace Medicine Report DOT/FAA/AM-19/4, Federal Aviation Administration Office of Aerospace Medicine, Washington DC.*
7. Copeland, K. (2021). *CARI-7 Documentation: Radiation Transport in the Atmosphere. Federal Aviation Administration Office of Aerospace Medicine Report DOT/FAA/AM-21/5, Federal Aviation Administration Office of Aerospace Medicine, Washington DC.*
8. Copeland, K. (2021). *CARI-7 Documentation: Particle Spectra. Federal Aviation Administration Office of Aerospace Medicine Report DOT/FAA/AM-21/4, Federal Aviation Administration Office of Aerospace Medicine, Washington DC.*
9. Copeland, K. (2020). *CARI-7 Documentation: Geomagnetic Cutoff Rigidity Calculations and Tables for 1965-2010. Federal Aviation Administration Office of Aerospace Medicine Report DOT/FAA/AM-19/4, Federal Aviation Administration Office of Aerospace Medicine, Washington DC.*
10. *The Space Industry Regulations 2021 Part 9 Chapter 2 Regulation 139 [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.legislation.gov.uk/uksi/2021/792/part/9/made>. Date of access: 02.12.2024.*
11. *Dosimetry of aircrew personnel [Electronic resource]. Mode of access: https://www.bag.admin.ch/dam/bag/en/dokumente/str/DOS/merkblatt_flugpersonal.pdf/download.pdf/Merkblatt_Dosimetrie%20des%20Flugpersonals_EN.pdf. Date of access: 02.12.2024.*
12. *Международная организация гражданской авиации. Руководство по авиационной медицине: Doc 8984 AN/895. 3-е изд. Монреаль: ICAO, 2012.*
13. *Results of the EAN request on radiation protection of aircraft crew [Электронный ресурс]. Mode of access: <https://eu-alara.net/index.php/activities/eas-documents-and-publications/docman-menu/survey/85-aircraft-crew/file.html>. Date of access: 21.10.2024.*
14. B. J. Lewis, L. G. I. Bennett, A. R. Green, M. J. McCall, B. Ellaschuk, A. Butler, M. Pierre. *Galactic and Solar Radiation Exposure to Aircrew during a Solar Cycle / Radiation Protection Dosimetry. 2002. Vol. 102 iss. 3. P. 207–228.*
15. *Model FS-AD1 Data Sheet [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.fwt.com/detector/fw-ad1ds.htm/>. Date of access: 14.12.2024.*
16. G. Battistoni, A. Ferrari, M. Pelliccioni, R. Villari. *Evaluation of the doses to aircrew members taking into consideration the aircraft structures / Advances in Space Research. 2005. Vol. 36 iss. 9. P. 1645–1652.*

UDC 621.039.76:629.735.45

USING SOFTWARE FOR MONITORING SPACE RADIATION AND ASSESSING RADIATION DOSE FOR COMMERCIAL AIR FLIGHT CREWS

Khadzhynava K. A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Tsyavlovskaya N.V – Master of Sci., Senior Lecturer at the Department of EPE

Annotation. The impact of cosmic radiation on commercial air crews and the importance of monitoring it are considered. ICRP and ICRP recommendations for accounting for this radiation are presented. The results of radiation dose calculations using CARI-7 software are presented, emphasizing the importance of accurate assessments for flight safety.

Keywords: cosmic radiation, commercial aircraft crews, dosimetric monitoring, ICRP, ICRP, software, CARI-7, software, effective dose, ambient equivalent, solar activity, geomagnetic conditions, galactic cosmic rays, solar-proton storms, flight safety