

Е.И. Маткевич¹, В.И. Бурмистров², И.В. Иванов^{2,3}

ОЦЕНКА ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ ЛЕТНОГО СОСТАВА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ И ОБОСНОВАНИЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ИХ СНИЖЕНИЮ

¹ Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

² Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Минздрава России, Москва

³ Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины Министерства обороны Российской Федерации, Санкт-Петербург

Контактное лицо: Иван Васильевич Иванов, e-mail: ivanov-iv@yandex.ru

РЕФЕРАТ

Актуальность: При глубоком и обширном анализе уровней ионизирующего излучения, характерных для космического пространства и обуславливающих факторы радиационной опасности для космонавтов, вопросы оценки радиационной обстановки в авиаперелетах также остаются по-прежнему актуальными.

Цель: Оценка доз облучения летного состава воздушных судов за год профессиональной деятельности и обоснование мероприятий по их снижению.

Материал и методы: При расчетах эквивалентных доз излучения при авиационных полетах использовали данные с сервера RUSCOSMICS, при этом исходили из 90 ч полетов в календарном месяце при годовой норме налёта 900 ч. Проанализированы уровни эффективной дозы облучения летного состава при ежегодных медицинских обследованиях в целях врачебно-лётной экспертизы.

Результаты: Установлено, что доза облучения летного состава составила за календарный месяц 362 мкЗв, за 10 месяцев года – 3,62 мЗв, что выше среднего годового предела для населения, но не превышает санитарные нормативы для экипажей самолетов (5 мЗв). Достижимый при снижении дозы облучения летного состава экономический эффект от снижения отдаленных последствий облучения обуславливает актуальность и практическую значимость совершенствования мероприятий по снижению дозовой нагрузки на летный состав воздушных судов. Комплекс мероприятий по снижению доз облучения летного состава должен включать: организацию учёта доз облучения летного состава при авиаперелетах и контроль за соблюдением нормативных уровней, снижение доз облучения летного состава при медицинских обследованиях, снижение доз облучения летного состава путём совершенствования противорадиационной защиты самолёта.

Заключение: Выполненный анализ суммарных годовых доз облучения летного состава при авиаперелетах в условиях фоновой солнечной активности и при солнечных вспышках, а также при медицинских диагностических обследованиях обосновывает необходимость проведения мероприятий по их снижению по основным направлениям: учёта доз облучения летного состава при авиаперелетах, контроля за соблюдением нормативных уровней, оптимизации методов лучевой диагностики для исключения необоснованного облучения летного состава при медицинских обследованиях, а также разработке перспективных конструкторских решений по совершенствованию противорадиационной защиты кабины самолёта.

Ключевые слова: авиационные полеты, летный состав, профессиональное облучение, медицинские обследования, дозы излучения, нормы радиационной безопасности, снижение дозы облучения

Для цитирования: Маткевич Е.И., Бурмистров В.И., Иванов И.В. Оценка доз облучения летного состава воздушных судов и обоснование мероприятий по их снижению // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2025. Т. 70. № 6. С. 28–39. DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-6-28-39

Е.И. Matkevich¹, V.I. Burmistrov², I.V. Ivanov^{2,3}

Assessment of Radiation Doses of Aircraft Flight Personnel and Justification of Measures to Reduce them

¹ A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

² I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russia

³ State Scientific-Research Institute of Military Medicine, Saint-Petersburg, Russia

Contact person: I.V. Ivanov, e-mail: ivanov-iv@yandex.ru

ABSTRACT

Relevance: With a deep and extensive analysis of ionizing radiation levels characteristic of outer space and determining radiation hazard factors for astronauts, the issues of assessing the radiation situation in air travel also remain relevant.

Purpose: Was to assess the radiation doses of aircraft flight personnel over a year of professional activity and to justify measures to reduce them.

Material and methods: When calculating equivalent radiation doses during aviation flights, data from the RUSCOSMICS server was used, based on 90 hours of flights per calendar month with an annual flight time of 900 hours. The levels of the effective radiation dose of flight personnel during annual medical examinations for the purpose of medical flight examination are analyzed.

Results: It was found that the radiation dose of flight personnel amounted to 362 μ Sv for a calendar month, 3.62 mSv for 10 months of the year, which is higher than the average annual limit for the population, but does not exceed the sanitary standards for aircraft crews (5 mSv).

The economic effect achieved by reducing the radiation dose to flight personnel from reducing the long-term effects of exposure determines the relevance and practical importance of improving measures to reduce the dose burden on aircraft flight personnel. A set of measures to reduce radiation doses to flight personnel should include: accounting for radiation doses to flight personnel during air travel and monitoring compliance with regulatory levels, reducing radiation doses to flight personnel during medical examinations, and reducing radiation doses to flight personnel by improving aircraft radiation protection.

Conclusion: The analysis of the total annual radiation doses to flight personnel during air travel in conditions of background solar activity and solar flares, as well as during medical diagnostic examinations, justifies the need for measures to reduce them in the main areas: accounting for radiation doses to flight personnel during air travel, monitoring compliance with regulatory levels, optimizing radiation diagnostic methods to exclude unjustified radiation exposure of flight personnel during medical examinations, as well as the development of promising design solutions to improve the anti-radiation protection of the aircraft cabin.

Keywords: *aviation flights, flight personnel, professional exposure, medical examinations, radiation doses, radiation safety standards, radiation dose reduction*

For citation: Matkevich EI, Burmistrov VI, Ivanov IV. Assessment of Radiation Doses of Aircraft Flight Personnel and Justification of Measures to Reduce them. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2025;70(6):28–39. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-6-28-39

Введение

Проблеме радиационного воздействия на летные экипажи при авиационных полётах уделяется большое внимание в связи с тем, что летный состав и авиапассажиры подвергаются постоянному воздействию малых доз радиации за счет космического ионизирующего излучения. Эффективные дозы облучения членов летного экипажа колеблются от 2 до 12 мкЗв за полёт и оцениваются в пределах от 2 до 5 мЗв за год [1–7]. Это зависит от расстояния авиаперелета, высоты и широтной зоны полета, а также от состояния солнечной активности (СА).

На атмосферу Земли воздействуют одновременно солнечные космические лучи (СКЛ) и галактические космические лучи (ГКЛ). Потоки СКЛ отражают изменение СА – нарастают в фазе роста СА, спадают в фазе спада СА и максимальны вблизи её максимума [8, 9]. Потоки ГКЛ изменяются в противофазе с солнечной активностью – максимальны вблизи минимума СА.

Возрастание СА, особенно в период солнечных вспышек, приводит к увеличению уровней радиации в верхних слоях атмосферы за счет каскадного эффекта ионизации атомов азота и кислорода космическими лучами и вторичного радиационного излучения [5]. Вследствие этого мощность дозы радиации с возрастом расстояния от поверхности земли увеличивается и максимальна на высотах от 11 до 17 км от поверхности земли [8, 10]. Установлено также, что за 2 ч полета в северных широтах в период мощных солнечных вспышек классов М и Х члены экипажа самолета получают дозу облучения в 10–12 раз большую, чем в период минимума СА [11], что увеличивает у летного состава показатели радиационного риска за всю карьеру [12, 13].

Однако целенаправленная оценка уровней облучения летного состава в профессиональных условиях с учетом вспышечной активности солнца до настоящего времени не проводилась. Кроме того, значительные дозы облучения эти лица могут получать при медицинских диагностических обследованиях. Это обуславливает актуальность подобного рода исследований, а также важность разработки мероприятий по снижению доз облучения летного состава.

Цель исследования состояла в оценке доз облучения летного состава воздушных судов за год профессиональной деятельности и обосновании мероприятий по их снижению.

Материал и методы исследования

При расчетах доз облучения летного состава за год профессиональной деятельности была использована карта расчетов эквивалентной дозы излучения (рис. 1),

получаемая при помощи модели прохождения космических лучей через атмосферу Земли с использованием данных о первичном спектре и уровнях протонов, полученных от геостационарного спутника GOES [14–16]. По данным [17] поле радиационного излучения в кабине и салоне гражданского воздушного судна мало отличается от поля в свободной атмосфере. Так, по плотности потока нейтронов отличия не превышают 10–12 %. Поэтому при расчете дозы облучения членов летного экипажа и пассажиров в кабинах и салонах воздушных судов могут быть использованы данные о дозовых характеристиках в свободной атмосфере.

Обновление карты на сервере RUSCOSMICS происходит в режиме реального времени с периодичностью 5 мин для высот от 1 до 20 км над поверхностью земли.

При расчете эквивалентных доз радиации для членов экипажа воздушного судна гражданской авиации за 90 ч в календарном месяце исходили из продленной годовой нормы налёта 900 ч [18]. При этом принимали, что полетная смена – период рабочего времени с начала предполетной подготовки до завершения послеполетных работ, полетное время – период рабочего времени от запуска двигателей перед взлетом и до выключения (останова вращения воздушных винтов) после посадки.

Для унификации расчетов исходили из крейсерской высоты полетов 12 км для современных гражданских авиалайнеров семейств Airbus A320 и Boeing 737. Так как около 95 % времени авиаперелёта проходит на этой высоте, при расчете учитывали только дозу облучения за время полета на этой высоте, без учета незначительного вклада в общую дозовую нагрузку за авиаперелет дозы облучения от взлета до момента набора высоты и при снижении высоты и посадке.

Проанализированы уровни эффективной дозы облучения летного состава при медицинских обследованиях в целях врачебно-летней экспертизы.

При расчетах экономического эффекта в год от снижения дозы облучения летного состава исходили из следующих положений. Для обоснования расходов на радиационную защиту при реализации принципа оптимизации принимается, что облучение в коллективной эффективной дозе в 1 чел.-Зв приводит к потенциальному ущербу, равному потере 1 чел.-года жизни населения [19]. Величина денежного эквивалента потери 1 чел.-года жизни устанавливается отдельными документами федерального уровня в размере не менее 1 годового душевого национального дохода. На основе такого подхода осуществляется поиск оптимального уровня радиационной защиты и обоснование расходов на неё [20].

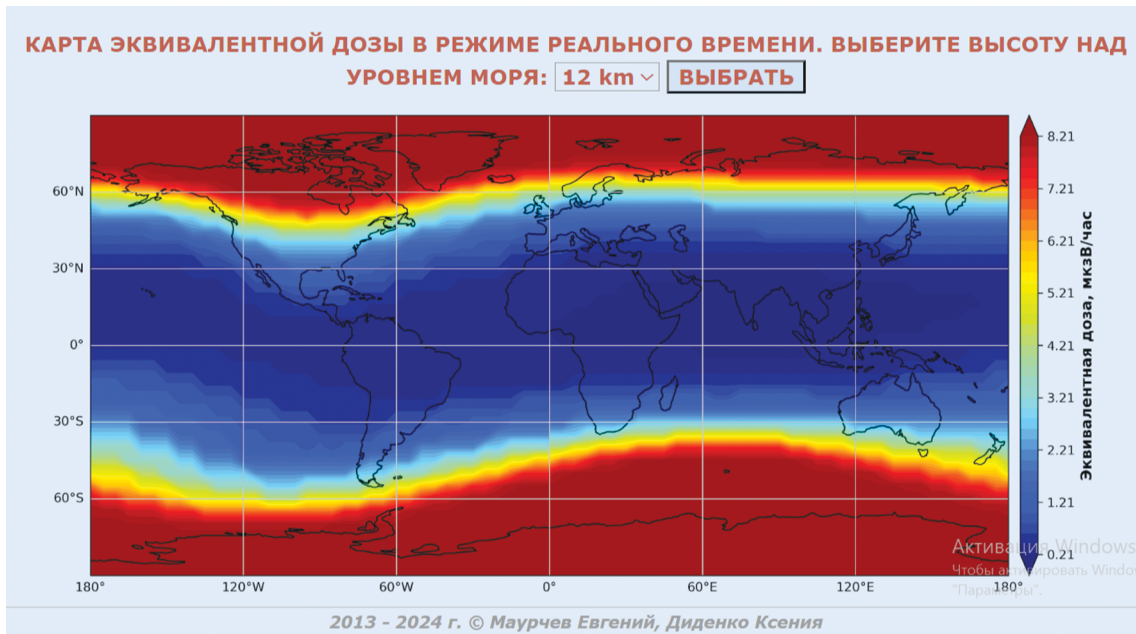


Рис. 1. Карта эквивалентной дозы (мкЗв/ч) в реальном режиме времени на задаваемой высоте (<https://www.ruscsmics.ru/>). На левой оси ординат обозначены значения широты (N°, S°), на цветной шкале справа от интерактивного графика – значения мощности дозы (мкЗв/ч), на оси абсцисс – значения долготы (W°, E°)

Fig. 1. Map of the equivalent dose ($\mu\text{Sv/hr}$) in real time at a preset altitude (<https://www.ruscsmics.ru/>). The left ordinate axis shows latitude values (N° – north, S° – south), the color scale to the right of the interactive graph shows dose rate values (mkSv/hr), and the abscissa axis shows longitude values (W° – west, E° – east)

Результаты

1. Анализ доз профессионального облучения летного состава

Используя значения мощности дозы по карте эквивалентной дозы на высоте 12 км для заданных условий полета (широта, долгота маршрута, продолжительность полетного времени) был проведен расчет эквивалентных доз радиации для членов экипажа воздушного судна гражданской авиации за 90 ч в календарном месяце (табл. 1), исходя из продленной годовой нормы налета 900 ч [18].

Как видно из табл. 1, доза облучения летного состава составит итого за календарный месяц 362 мкЗв, тогда за 10 месяцев года – 3,62 мЗв, что не превышает санитар-

ные нормативы для экипажей самолетов (5 мЗв), как это определено в НРБ-2009, раздел IV. Требования к защите от природного облучения в производственных условиях п. 4.1 [19]. Эффективная доза облучения природными источниками излучения всех работников, включая персонал, не должна превышать 5 мЗв в год в производственных условиях (любые профессии и производства), п.4.3. Воздействие космических излучений на экипажи самолетов нормируется как природное облучение в производственных условиях по п. 4.1. Однако 5 мЗв в год – это выше, чем норматив для населения 1 мЗв в год, и это приводит к увеличению риска отдаленных негативных последствий у летного состава. По рекомендациям Международного комитета по радиационной защите (МКРЗ) [21], озабоченность этими рисками должна быть повы-

Таблица 1

Эквивалентные дозы радиации для членов экипажа воздушного судна гражданской авиации на высоте авиационного полета 12 км за календарный месяц*

Equivalent radiation doses for crew members of a civil aviation aircraft at an altitude of 12 km per calendar month*

№	Маршрут авиаперелета	Кол-во полетных смен за авиаперелет	Полетное время (ч)		Вспышечная активность солнца**	Эквивалентная доза, мкЗв	
			За смену	За авиаперелет		За смену	За авиаперелет
1.1	Мурманск – Москва – Мурманск	2	5	10	слабая	19,80	39,60
1.2	Мурманск – Москва / Москва – Мурманск	2	5	10	средняя	В Москву 149,11 + из Москвы 9,90	159,01
1.3	Норильск – Ташкент – Норильск	2	8	16	слабая	27,16	54,32
1.4	Норильск – Красноярск – Норильск	3	5	15	слабая	20,24	60,72
1.5	Москва – Тюмень – Москва	2	6	12	слабая	10,20	20,40
2.1	Москва – Симферополь – Москва	1	6	6	слабая	3,92	3,92
2.2	Москва – Минводы – Москва (через Ростов)	1	6	6	слабая	4,56	4,56
2.3	Москва – Минводы – Москва (через Актау)	1	8	8	слабая	7,92	7,92
2.4	Новосибирск – Ташкент – Новосибирск	2	6	12	слабая	5,78	11,56
Итого: за календарный месяц		15		90			362,01

Примечания: * – при расчете учитывали только дозу облучения за время полета на высоте 12 км, без учета дозы облучения за время взлета и посадки; ** – слабая – солнечные вспышки класса C, средняя – солнечные вспышки класса M

шенной, начиная с верхней границы природного фона, а при оценке эквивалентной годовой дозы, получаемой человеком от всех природных источников (природного фона), установлено, что среднемировая доза составляет 2,4 мЗв (типичный диапазон – 1–12,4 мЗв) [22]. Поэтому представляется важным проведение мероприятий по снижению доз облучения летного состава.

2. Расчет экономической эффективности от снижения профессионального облучения летного состава

Известен подход к оценке причиняемого населению ущерба опасными и вредными факторами, эффективности защитных и природоохранных мероприятий, подобный применяемому к оценке эффективности инвестиционных проектов [23]. При этом денежные затраты на проведение мероприятий сопоставляются, например, с величиной дополнительно полученного внутреннего валового национального дохода, вследствие сохранения жизни и здоровья работников. В соответствии с НРБ 99–2009 «Для обоснования расходов на радиационную защиту при реализации принципа оптимизации принимается, что облучение в коллективной эффективной дозе в 1 чел.-Зв приводит к потенциальному ущербу, равному потере примерно 1 чел.-года жизни населения». Величина денежного эквивалента потери 1 чел.-года жизни устанавливается отдельными документами федерального уровня (методическими указаниями Госсанэпиднадзора) в размере не менее 1 годового душевого национального дохода. Для оценки этого параметра используются оценки валового национального дохода на душу населения, производного от валового национального дохода (ВНД) / Gross National Income (GNI).

ВНД – один из ключевых показателей экономического развития стран мира — совокупная ценность всех товаров и услуг, произведенных в течение года на территории государства (то есть валовой внутренний продукт – ВВП), плюс доходы, полученные гражданами и организациями страны (резидентами) из-за рубежа, минус доходы, вывезенные из страны иностранными гражданами и организациями (нерезидентами). Информация о ВНД стран мира, а также ВНД на душу населения, в том числе для Российской Федерации, публикуется в ежегодных сборниках показателей развития Всемирного банка, которые составляются на основе официально признанных источников World Bank national accounts data, and OECD National Accounts data files. License : CC BY-4.0 и периодически обновляются в соответствии с последними результатами этих анализов. Согласно этому сборнику Всемирного банка, ВНД на душу населения в Российской Федерации (среднегодовой показатель в текущей национальной валюте) за последние 4 года составлял: в текущих рублях РФ (рис. 2): 2020 г. – 711 772,06 руб., 2021 г. – 900 742,75 руб., 2022 г. – 1 035 817 руб., 2023 г. – 1 161 019 руб. [24].

Исходя из размера годового душевого национального дохода для Российской Федерации в 2023 г. в сумме 1 161 019 руб. [24, 25], экономический эффект от снижения дозы облучения на 1 мЗв в год составит:

у 1 чел. 1 161 019 руб. / 1000 мЗв = 1161,02 руб. в год,
у 10 чел. = 1161,02 × 10 = 11 610,2 руб. в год,
у 100 чел. = 1161,02 × 100 = 116 102,00 руб. в год,
у 500 чел. = 1161,02 × 500 = 580 510,00 руб. в год

Достижимый экономический эффект обуславливает актуальность и практическую значимость совершенствования мероприятий по снижению дозовой нагрузки на летный состав.

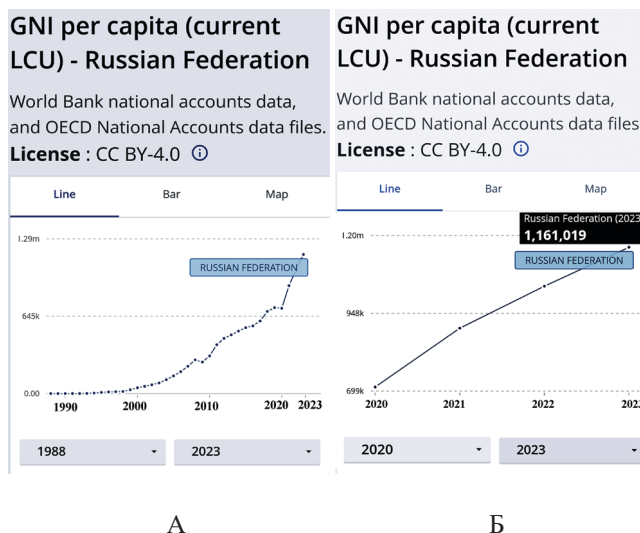


Рис. 2. GNI per capita (current LCU) – Russian Federation 2020–2023 / Валовой национальный доход на душу населения (по оси ординат – текущая национальная единица, рубли) – Российская Федерация А – 1988–2023 гг, Б – 2020–2023 гг [24]

Fig. 2. GNI per capita (current LCU) – Russian Federation 2020–2023 / Gross national income per capita (along the ordinate axis – current national unit, rubles) – the Russian Federation А – 1988–2023, Б – 2020–2023 [24]

3. Мероприятия по снижению доз облучения летного состава

В Российской Федерации национальная система регулирования радиационной защиты и обеспечения радиационной безопасности опирается на три основных документа: ФЗ № 3 от 09.01.1996 «О радиационной безопасности населения», «Нормы радиационной безопасности НРБ-99» и «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99».

Последние два документа построены с использованием величин, регламентированных МАГАТЭ в Стандартах по ядерной безопасности (NUSS – Nuclear Safety Standards). Однако допустимое значение эффективной дозы, обусловленной суммарным воздействием природных источников излучения, для населения не устанавливается. Так, в Федеральном законе «О радиационной безопасности населения» указано: «Регламентируемые значения основных пределов доз облучения не включают в себя дозы, создаваемые естественным радиационным и техногенно измененным радиационным фоном, а также дозы, получаемые гражданами (пациентами) при проведении медицинских рентгенорадиологических процедур и лечения». Согласно НРБ-99, эффективная доза облучения природными источниками излучения всех работников, включая персонал, не должна превышать 5 мЗв в год в производственных условиях (любые профессии и производства).

Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ) остается приверженной беспороговой концепции негативного влияния малых доз ионизирующего излучения, это положение справедливо для всего диапазона доз ионизирующего излучения ниже 100 мЗв. В связи с этим для снижения доз облучения летного состава представляется необходимым проведение комплекса мероприятий.

3.1. Организация учёта доз облучения летного состава при авианерелетах и контроль за соблюдением нормативных уровней

В Публикации 60 МКРЗ [21] было рекомендовано, считать воздействие космического излучения частью

профессионального облучения при эксплуатации коммерческих реактивных самолетов и при космических полетах. МКРЗ отметил, что единственными практическими мерами регулирования профессионального облучения летных экипажей является контроль полетного времени и выбор маршрута перелета.

Вслед за МКРЗ Европейский союз ввел Директиву об основных нормах безопасности, согласно которой необходимо вести подсчет дозовых нагрузок членов экипажей воздушных судов, принимая во внимание превышение годового норматива в 1 мЗв/год. При этом перечисляются следующие защитные меры: (I) Оценка дозы облучения членов экипажа; (II) Организация рабочих графиков с учетом полученных дозовых нагрузок, с целью уменьшения дозы для тех членов экипажа, кто уже в значительной степени подвергся воздействию космического излучения; (III) Информирование сотрудников авиакомпаний о возможных рисках для их здоровья, связанных с облучением во время работы; (IV) Применение особых условий для членов экипажа женского пола, особенно в период беременности [26].

Согласно требованиям Международного союза гражданских авиоперевозчиков (ИКАО), с 2016 г. каждая страна-член ИКАО должна создать национальные сервисы космической погоды для авиакомпаний. Диагноз и прогноз эквивалентной дозы при авиaperелете может быть осуществлен с одновременным использованием данных мониторинга солнечной активности, состояния магнитного поля Земли и современных моделей космической погоды.

В настоящее время ограничение облучения летного состава осуществляется регламентированием общего годового налета, который не должен превышать 900 ч в год [18]. При лимите 5 мЗв/год (5000 мкЗв/год) это составляет 5,56 мкЗв за 1 ч полета или 55,6 мкЗв за 10 ч полетов. Следовательно, ограничение полетов для летного состава в год составляет не более 90 полетов по 10 ч полетного времени для каждого или не более 180 полетов по 5 ч полетного времени для каждого. Индивидуальный учет доз облучения летного состава в период выполнения полетов в настоящее время проводится расчетным методом с регистрацией в документах учета.

3.2. Мероприятия по снижению доз облучения летного состава при медицинских обследованиях

Для обеспечения безопасности полетов с целью контроля за состоянием здоровья летного состава периодичность его медицинских обследований строго регламентирована. При выполнении рекомендаций по врачебно-летной экспертизе (ВЛЭ) [27] устанавливается стационарное углубленное обследование летного состава, в том числе с применением КТ-исследований, после достижения 30 лет с периодичностью 1 раз в год – при наличии патологии, 1 раз в 3 года – при изменениях, не влияющих на летную деятельность, и 1 раз в 4 года – с диагнозом «здоров». Таким образом, средняя эффективная доза облучения и кратность облучения летного состава значительно выше, чем в популяции. Анализ эффективных доз лучевой нагрузки при первичном обследовании летного состава и при динамическом наблюдении за летчиками с диагнозом «здоров» показал (табл. 2), что они не очень велики и стабильны, составляют 5,0–5,09 мЗв и находятся в прямой зависимости от объема обследования, регламентированного руководящими документами для стационарного этапа ВЛЭ [27].

Большую часть лучевой нагрузки (72 %) летный состав получает при традиционном рентгенологическом исследовании (РГ) пояснично-крестцового отдела по-

Таблица 2

Уровни эффективной дозы облучения летного состава при первичном обследовании в целях ВЛЭ [28]
Effective radiation dose for flight personnel during the initial checkup for medical flight examination [28]

Категории летного состава	Объем исследования (в 2-х проекциях)	Эффективная доза, мЗв
Все категории	Рентгенография (РГ) органов грудной клетки (ОГК)	1,0
	РГ околоносовых пазух	0,1
	РГ грудного отдела позвоночника	1,0
	РГ пояснично-крестцового отдела позвоночника	2,9
	Всего	5,0
Пилоты высокоманевренных самолетов	Дополнительно: РГ шейного отдела позвоночника	0,09
	Всего	5,09

звоночника [28, 29]. В случае выявления изменений в органах и системах по данным первичного лучевого обследования, а также по клиническим показаниям с целью уточнения диагноза выполняется углубленное радиологическое исследование (табл. 3). Как следует из этой таблицы, эффективная лучевая нагрузка при этом

Таблица 3

Эффективная доза облучения летного состава при углубленном радиологическом обследовании по органам и системам в целях ВЛЭ

Effective radiation dose for flight personnel during in-depth radiological Check-up of organs and systems for medical flight examination

Показания	Объем исследования*	Эффективная доза, мЗв
Изменения лицевого скелета, околоносовых пазух, височных костей и головного мозга	РГ черепа в 2 проекциях	0,1
	КТ головного мозга	5,5
	Ортопантомография	0,1
	КТ ОНП в аксиальной плоскости	5,5
	КТ ОНП во фронтальной плоскости	6,5
	КТ с болюсным усилением	8,0
	Всего	5,6–25,7
Изменения опорно-двигательного аппарата	РГ ШОП с функциональными пробами	0,2
	РГ всех отделов позвоночника в 2 проекциях	4,1
	КТ одного двигательного сегмента	3,0
	Всего	0,22–7,31
Изменения органов грудной клетки	РГ ОГК в 2 проекциях	1,0
	РС ОГК	3,0
	КТ ОГК с пробами	16,5
	КТ с болюсным усилением	8,0
	Всего	3,0–27,5
Изменения мочевыделительной системы	Обзорная урограмма (1 снимок)	1,4
	Экскреторная урограмма (4 снимка)	5,6
	КТ почек	5,5
	КТ органов малого таза	6,0
	КТ с болюсным усилением	8,0
	Радионуклидное исследование	0,04
	Всего	7,0–26,54
Изменения органов живота	РГ обзорная (1 снимок)	0,4
	РС пищевода	11,0
	РС желудка и 12-перстной кишки	26,4
	РС толстой кишки	22,0
	КТ органов брюшной полости	10,0
	КТ органов брюшной полости с болюсным усилением	14,0
	Всего	11,4–83,8

Примечание: * условные обозначения: РГ – рентгенография, РС – рентгеноскопия, КТ – компьютерная томография, ШОП – шейный отдел позвоночника, ОНП – околоносовые пазухи, ОГК – органы грудной клетки

существенно увеличивается и дополняет уже полученную на первичном этапе диагностики дозу облучения.

Дозы облучения при КТ зависят от параметров сканирования, характеристик томографа и анатомических особенностей пациента. Они могут быть от 5 до 100 раз выше, чем при рентгенографии той же анатомической области. Эффективная доза составляет при КТ органов грудной клетки 4–5 мЗв, органов брюшной полости без контрастирования – около 10 мЗв [30].

Как видно из табл. 3, наибольшие эффективные дозы лучевой нагрузки установлены при дополнительной диагностике заболеваний органов брюшной полости с контрастированием (от 11,4 до 83,8 мЗв). При обследовании лицевого скелета, околоносовых пазух, височных костей и головного мозга, органов грудной клетки и мочевыделительной системы суммарные дозы на каждую область составляли до 25–27,5 мЗв. Это подчеркивает важность контроля дозы излучения и индивидуализации параметров КТ-сканирования.

За последние годы в отечественные нормативные документы последовательно внедряется современная международная методология радиационной защиты от медицинского облучения, основой которой являются принципы обоснования назначения диагностических и лечебных процедур с применением ионизирующих излучений, оптимизации их проведения и защиты пациента. В связи с этим актуально внедрение в практику КТ-диагностики принципов предотвращения случаев избыточного облучения пациентов и особенно тех, чья профессиональная деятельность связана с воздействием ионизирующего излучения, в том числе летного состава.

В аспекте реализации принципов защиты от излучения, разработанных МКРЗ, нами был проведен анализ мероприятий и методик, направленных на уменьшение дозы облучения при КТ пациентов и персонала, профессионально связанного с ионизирующими излучениями. Для этого проанализированы отечественные и зарубежные публикации о методах уменьшения дозовой нагрузки на пациентов при компьютерной томографии по базам данных Scopus, MedLine и РИНЦ и выполнена их систематизация.

По результатам выполненного анализа факторы, используемые для снижения дозы при КТ, сгруппированы по трем основным направлениям:

- 1) организационные мероприятия, зависящие от лечащего врача, врача-рентгенолога и других сотрудников кабинета КТ-диагностики;
- 2) модификация параметров протокола исследования;
- 3) использование особенностей КТ-аппаратов и программного обеспечения.

К организационным мероприятиям относятся обоснованное назначение КТ-исследований лечащим врачом; разработка и не превышение референсных диагностических уровней; применение индивидуальных средств противорадиационной защиты; обеспечение качественной работы оборудования в условиях эксплуатации.

Для модификации параметров протокола КТ исследования могут использоваться варьирование напряжением на рентгеновской трубке, силой тока трубки; обоснованный выбор коллимации, скорости движения стола и пичча, времени ротации трубки и количества фаз исследования, протяженности области исследования, а также использование предустановленного протокола, особенно, низкодозных протоколов в сочетании с алгоритмами итеративной реконструкции КТ-изображений.

Использование особенностей КТ-аппаратов и программного обеспечения предполагает разработку производителями детекторов с новыми конструктивными осо-

бенностями, повышающими их эффективность, оптимизацию средств коллимации и фильтрации рентгеновского излучения, обеспечение автоматической модуляции тока трубки и напряжения на трубке, модификацию геометрии сканирования и параметров ядра свертки (Kernel) при расчете дозового распределения методом тонкого луча.

Данные направления позволяют снизить дозу облучения при диагностических КТ-исследованиях летного состава и тем самым уменьшить негативные эффекты воздействия на них ионизирующего излучения в отдаленном периоде.

Летный состав за время авиAPERелета может облучаться в дозах от 0,3 до 0,8 мЗв, особенно при солнечных вспышках. В связи с этим дополнительное облучение в ходе медицинских диагностических обследований в предполетный и послеполетный периоды должно быть минимизировано. Вследствие этого при проведении КТ-исследований необходимо стремиться к уменьшению дозы облучения и шире использовать возможности всех направлений оптимизации лучевой нагрузки [28, 31–33]:

- полноценное осуществление лечащим врачом, врачом-рентгенологом, другим персоналом кабинета КТ, а также представителями администрации и инженерного состава лечебно-профилактических учреждений всего возможного комплекса мероприятий по уменьшению лучевой нагрузки на обследуемых лиц;
- выполнение КТ только по обоснованным показаниям, для чего, в том числе, необходимо использование современных компьютерных систем рационального выбора методов диагностики и порядка их проведения при направлении пациентов на лучевые диагностические исследования;
- отказ от лишних фаз контрастирования в пределах одного КТ-исследования, а также от выполнения повторных исследований, не приносящих дополнительной диагностической информации;
- учет факторов снижения дозы облучения пациентов при выборе параметров протокола КТ-исследования без ущерба для качества КТ-изображений; в частности, необходимо более широкое применение низкодозных протоколов сканирования в сочетании с алгоритмами итеративной реконструкции изображений для сохранения их качества и диагностической информативности;
- своевременная замена устаревших моделей КТ-сканеров более совершенными моделями с опциями применения низкодозных протоколов КТ-исследований в сочетании с алгоритмами итеративной реконструкции;
- переход на современные методы учета доз облучения, в том числе компьютеризованный учет лучевой нагрузки при всех рентгенологических, в том числе КТ исследованиях, выполняемых одному пациенту независимо от места их выполнения.

В целом, учет факторов снижения дозы облучения пациентов путём обоснования необходимости КТ-исследования, выбора параметров протокола, КТ-аппаратов и программного обеспечения позволяют уменьшить лучевую нагрузку на пациентов без ущерба для качества медицинского обследования и КТ-изображений на 10–78 % и более [27, 29]. Замена при ежегодной врачебно-летной комиссии диагностических исследований с применением КТ на МРТ и УЗИ позволит исключить облучение летного состава в дозе от 5 до 10 мЗв за 1 процедуру КТ. При этом экономический эффект (ЭЭ) от замены КТ на равноценное по диагностическим возможностям МРТ или УЗИ у 500 чел. лет-

ного состава составит при индивидуальной дозе 5 мЗв и 10 мЗв соответственно:

$$\begin{aligned} \text{ЭЭ}_{5 \text{ мЗв}} &= 1161,2 \text{ руб.} \times 500 \text{ чел.} \times 5 \text{ мЗв} = \\ &= 2\,903\,000 \text{ руб. в год,} \\ \text{ЭЭ}_{10 \text{ мЗв}} &= 1161,2 \text{ руб.} \times 500 \text{ чел.} \times 10 \text{ мЗв} = \\ &= 5\,806\,000 \text{ руб. в год.} \end{aligned}$$

3.3. Снижение доз облучения летного состава путём совершенствования противорадиационной защиты самолёта

Прогнозы солнечного цикла используются различными агентствами и многими промышленными группами. Солнечный цикл важен для определения срока службы спутников на низкой околоземной орбите, поскольку показания спутников dragon коррелируют с солнечным циклом, особенно в виде данных F10.7cm. Кроме того, прогноз дает приблизительное представление о частоте штормов космической погоды всех типов, от радиопомех до геомагнитных и радиационных бурь, поэтому используется многими отраслями промышленности для оценки ожидаемого воздействия космической погоды в ближайшие годы. Международные прогнозы говорят о том, что максимум SA приходится на 2024 и 2025 гг, но точно спрогнозировать время конкретной солнечной вспышки и геомагнитной бури невозможно. Поэтому пока ученые могут лишь наблюдать за ситуацией по данным с телескопов и спутников и оповещать о солнечной вспышке сразу после её обнаружения. В связи со скоростью резкого всплеска радиационной активности предупредить об этом экипажи самолетов авиакомпаний не представляется возможным. У авиаперевозчиков нет технической возможности по этим данным задерживать спланированные заблаговременно сотни авиарейсов, либо менять расписание их вылетов и эшелоны полетов самолетов, уже находящихся в полете. Такие внезапные изменения вызовут сбой в работе диспетчерских служб и сотен аэропортов и даже авиационные происшествия в воздухе. Ввиду этого для повышения радиационной безопасности на стадии проектирования и производства могут быть внесены изменения в конструктивные элементы самолёта, повышающие противорадиационную защиту членов экипажа.

Возможность создания легких полимерных нанокompозитов, обладающих высокой прочностью, термостойкостью и необходимыми противорадиационными свойствами защиты от ионизирующего излучения, делают их пригодными для изготовления салонов и кабин пассажирских самолетов. Многообразие и большой перечень конструктивных и отделочных материалов, используемых при изготовлении воздушных судов, создают определенные трудности при оценке защитных свойств этих материалов от радиации. Результаты современных исследований и разработок в области космического материаловедения делают возможным создание новых полимерных нанокompозитов с заданными защитными свойствами, которые могут быть использованы для защиты от радиации кабин и пассажирских салонов воздушных судов (рис. 3) [34–42].

Как показывает проведенный анализ, общий подход к оценке противорадиационных свойств полимерного нанокompозита для диапазона от 20 кэВ до 3 МэВ, характерного для высоты полетов до 20 км, включает 2 основных этапа:

1) теоретический – изучение факторов приземной радиации и математическое моделирование прохождения ионизирующего излучения через полимерный защит-



Рис. 3. Схема конструкции кабины и салона пассажирского самолета [42]

Fig. 3. Design diagram of the cabin and cabin of a passenger aircraft [42]

ный материал; при этом данные по характеристикам химических элементов, включенных в защитный полимерный композит (например, описывающие полные сечения взаимодействия ионизирующего излучения с атомами защиты при разных энергиях) для нейтронов могут быть взяты из базы данных JANIS [43];

2) научно-практический – расчет коэффициентов ослабления ионизирующего излучения нанокompозитом (табл. 4), суммарное значение коэффициентов ослабления излучения, как правило, определяется 3 – 4 химическими элементами, тогда как остальные элементы незначительно изменяют их величину; массовые и линейные коэффициенты ослабления, а также длина свободного пробега для различных материалов в зависимости от энергии фотонного излучения, могут быть взяты из справочной литературы [44, 45].

Таблица 4

Пример рассчитанных коэффициентов ослабления рентгеновского и гамма-излучения с энергией от 20 кэВ до 3 МэВ для защитного-оптического стекла, в состав которого включены атомы веществ* [45]

An example of calculated attenuation coefficients of X-ray and gamma radiation with energies (E) from 20 keV to 3 MeV for protective optical glass, which includes atoms of substances* [45]

E, МэВ	₅ B	₈ O	₁₁ Na	₁₃ Al	₁₄ Si	₁₅ P	₁₉ K	₂₀ Ca
0,02	0,238	0,715	1,85	3,19	4,18	5,03	10,6	12,7
0,03	0,177	0,308	0,605	0,973	1,25	1,49	3,14	3,82
0,04	0,162	0,218	0,330	0,473	0,592	0,684	1,36	1,65
0,05	0,156	0,187	0,237	0,308	0,367	0,412	0,753	0,896
0,06	0,151	0,173	0,196	0,237	0,272	0,295	0,487	0,574
0,08	0,143	0,158	0,163	0,179	0,196	0,202	0,283	0,319
0,10	0,136	0,149	0,148	0,156	0,167	0,168	0,208	0,225
0,15	0,123	0,133	0,129	0,131	0,137	0,135	0,147	0,155
0,20	0,113	0,122	0,117	0,119	0,123	0,121	0,125	0,130
0,30	0,0980	0,106	0,102	0,102	0,106	0,103	0,105	0,108
0,40	0,0880	0,0952	0,0909	0,0917	0,0950	0,0923	0,0930	0,0950
0,50	0,0802	0,0869	0,0831	0,0839	0,0868	0,0842	0,0847	0,0873
0,60	0,0747	0,0805	0,0770	0,0775	0,0802	0,078	0,0784	0,0806
0,80	0,0652	0,0708	0,0676	0,0681	0,0703	0,0684	0,0687	0,0706
1,0	0,0591	0,0636	0,0608	0,0612	0,0632	0,0614	0,0619	0,0636
1,5	0,0479	0,0516	0,0498	0,0500	0,0517	0,0502	0,0505	0,0519
2,0	0,0410	0,0444	0,0427	0,0431	0,0446	0,0434	0,0439	0,0451
3,0	0,0328	0,0359	0,0348	0,0355	0,0367	0,0358	0,0365	0,0376

Примечание: * – номер слева внизу у химического элемента – порядковый номер атома в периодической системе Менделеева

Перспективным для получения эластичных самоклеящихся материалов для защиты (например, салона само-

лѐта) от гамма-излучения является этиленпропилендиеновый мономер, с включением микробарита, вольфрама обладающий высокой стойкостью к гамма-излучению и наиболее пригодный для формирования многослойных композитных материалов и покрытий на их основе [36]. Созданные на его основе радиационно-защитные покрытия обладают высокими свойствами адгезивности к стеклу, дюралюминию, стали и высокой кратностью ослабления гамма-излучения – линейный коэффициент ослабления излучения составил у баритового покрытия $10,1 \text{ см}^{-1}$ при энергии 59 кэВ и $0,195 \text{ см}^{-1}$ при энергии 661кэВ, а у вольфрамового покрытия, соответственно, $23,2 \text{ см}^{-1}$ и $0,72 \text{ см}^{-1}$.

Для улучшения защищенности от нейтронов применяется дополнительная защита из материалов с повышенным содержанием атомов водорода, которые обеспечивают более эффективное торможение первичных высокоэнергетических частиц, а также относительно невысокий выход вторичных нейтронов. Так, при анализе радиационных нагрузок на МКС при использовании защиты из композитного материала на основе фторопласта (толщиной 1 см, плотностью $4,05 \text{ г/см}^3$), получена кратность ослабления поглощенной дозы в интервале от 1,34 до 1,45 [40]. При этом защитный эффект композитного материала был обусловлен в основном уменьшением дозы от протонов радиационных поясов Земли, для которой кратность ослабления изменялась от 1,41 до 1,55, в то время как кратность ослабления галактических космических лучей не превышала 1,1.

В одном из исследований композитных материалов в том числе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) показано, что оптимальным по массо-габаритным показателям материалом при защите от быстрых нейтронов является материал из сферопластика, содержащий 20 % объемных бора [35, 39] (рис. 4).

Эксперименты показали, что использование борсодержащих сферопластиков Wikineutron при защите от потоков быстрых нейтронов дает выигрыш по массо-габаритным показателям (г/см^2). Коэффициенты ослабления нейтронного излучения при использовании защиты из полиэтилена с включением бора для защиты от 1 до 3 г/см^2 в 1,5 раза выше, чем у графита, и в 1,3 раза выше, чем у карбида бора [39]. Эти новые пластические и самоклеящиеся наноматериалы могут быть использованы для изготовления и отделки кабин и пассажирских салонов гражданских самолетов.

Увеличение противорадиационных защитных характеристик материалов кабины пилотов особенно важно при внезапных солнечных вспышках, от эффектов которых, как показали наши расчеты (табл. 1), уровень радиационного воздействия на летный состав повышается в несколько десятков раз по сравнению с периодом спокойного солнца. И другими способами снизить его в эти периоды не представляется возможным.

Применение при обшивке кабины и салона композиционных материалов из полиэтилена с содержанием бора толщиной 2 г/см^2 с коэффициентом ослабления 1,63 позволит снизить годовую дозу облучения с 3,62 до 2,22 мЗв. Экономический эффект от такого снижения дозы облучения (на $1,4 \text{ мЗв/год}$) у 500 чел. летного состава составит = $1161,2 \text{ руб.} \times 500 \text{ чел.} \times 1,4 \text{ мЗв} = 812 \text{ 840 руб.}$ в год.

Однако данный подход к снижению дозы облучения летного состава представляется самым сложным, так как материалы конструкции самолета строго регламентируются нормативными документами [46–48], которые устанавливают жесткие требования к проектированию и конструкции кабины пилотов и пассажирского салона

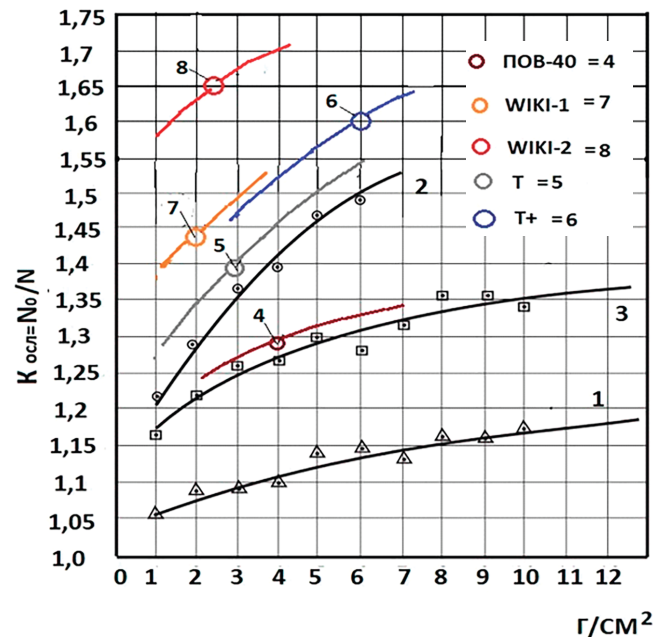


Рис. 4. Коэффициент ослабления нейтронного пучка в зависимости от массовой толщины исследуемых материалов: N_0 – поток нейтронов, измеренный без защитного материала, и N – поток нейтронов за защитным материалом; 1 – графит [34]; 2 – карбид бора [34]; 3 – борид вольфрама [34]; 4 – результаты нашего эксперимента для материала POW-40; 5–8 – результаты для новых разработанных материалов: 5 – T – СВМПЭ с добавлением 5 %-ного аморфного бора; 6 – T+ – это материал T, в который добавлены компоненты W; 7 – сферопластик wiki-1; 8 – сферопластик wiki-2 [35]

Fig. 4. The neutron beam attenuation coefficient depends on the mass thickness of the materials under study: N_0 is the neutron flux measured without a protective material and N is the neutron flux behind the protective material; 1 is graphite [34]; 2 is boron carbide [34]; 3 is tungsten boride [34]; 4 are the results of our experiment for the material POW-40; 5–8 – results for newly developed materials: 5 – T = ultra-high molecular weight polyethylene with the addition of 5 % amorphous boron; 6 – T+ – the material T, to which components W are added; 7 – spheroplastics wiki-1; 8 – spheroplastics wiki-2 [35]

средних и магистральных самолетов. Перед принятием в эксплуатацию все новые материалы кроме испытаний радиационно-защитных свойств (кратности ослабления излучения) должны проходить комплекс испытаний физико-механических свойств (массо-габаритные показатели, прочность, устойчивость к низким и высоким температурам, адгезия к стали, дюралюминию, стеклу и др.), химической стойкости (устойчивость к жидкостям и агрессивным средам), радиационной стойкости и старения, пожаробезопасности и др. [36]. В связи с этим необходимы дополнительные исследования и экспертиза разрабатываемых новых композитных материалов для противорадиационной защиты летного экипажа в самолетах гражданской авиации.

Заключение

По прогнозам специалистов ИКИ РАН [49], в одиннадцатилетнем 24-м цикле СА Солнце не менее активно, чем в предыдущем цикле СА, и в 2012–2013 гг. солнечные вспышки происходили одна за другой с интервалом менее 2 ч. Это сопровождается ежедневными выбросами более десятка миллионов тонн солнечной плазмы со сверхзвуковой скоростью. В зависимости от локации солнечных пятен и взаимного расположения Солнца и Земли направления этих выбросов могут совпадать или не совпадать с осью Солнце-Земля. Но всего за период с 2009 по 2020 гг. прогнозировалось около 40 тыс. солнечных вспышек и более 500 мощных геомагнитных бурь.

В настоящее время отмечается, что 25-ый цикл СА по числу мощных солнечных вспышек превосходит 24-ый цикл СА. Следовательно, при расчете дозовых нагрузок на летный состав при авиаперелетах важно учитывать не только фоновую СА, но и вероятность солнечных вспышек, что является довольно сложной проблемой.

Летный состав регулярно проходит медицинское обследование, включающее рентгенологические исследования, в том числе компьютерную томографию (КТ). После врачебно-летной экспертизы частота КТ не снижается и при последующем динамическом наблюдении составляет 10–12 % от обследованных пилотов в год. В результате персонал дополнительно получает значительную дозу облучения. Анализ параметров сканирования при КТ органов и систем летного состава на стационарном этапе ВЛЭ [28] свидетельствует о значительных объемных дозах лучевой нагрузки ($CTDI_{vol}$ от 5 до 50 ед.) особенно при исследованиях головного мозга и околоносовых пазух, органов грудной клетки и брюшной полости.

Полученные результаты согласуются с данными других исследователей [28, 29, 33] о том, что на дозовую нагрузку при лучевых обследованиях оказывает влияние совокупность факторов: тип рентгеновского аппарата, чувствительность детектора, приемник изображения, укладка пациента, площадь поля облучения, параметры режима сканирования, а также оптимальные алгоритмы обследования и квалификация персонала. Предложена система уменьшения объемных доз за счет изменения параметров сканирования: снижения напряжения на трубке и силы тока, что позволяет снизить $CTDI_{vol}$ при КТ на 30–50 % при сохранении качества получаемых изображений. Отмечается необходимость при первичной постановке диагноза и его дифференци-

альной диагностике применять алгоритмы с контролем эффективной дозы лучевой нагрузки, увеличивать долю диагностических исследований, лишенных лучевого воздействия (эндоскопических и ультразвуковых исследований, магнитно-резонансной томографии).

Как отмечено в ходе проведенного анализа, в настоящее время в России ведется большое количество научных и практических исследований в области авиационного материаловедения в интересах гражданской авиации, с целью уменьшения массы самолетов испытываются новые современные полимерные композиты, при этом возрастают требования к вновь разрабатываемым материалам [50]. Однако при создании на их основе новых прочных и легких конструктивных элементов основное внимание уделяется весовой эффективности конструкции самолета, не уделяется достаточного внимания оценке у используемых и вновь создаваемых для отделки кабин и салонов полимерных композитов их противорадиационных защитных свойств, поэтому эта проблема в настоящее время остается актуальной.

Таким образом, выполненный анализ суммарных годовых доз облучения летного состава при авиаперелетах в условиях фоновой СА и при солнечных вспышках, а также при медицинских диагностических обследованиях обосновывает необходимость проведения мероприятий по их снижению по основным направлениям: учёта доз облучения летного состава при авиаперелетах, контроля за соблюдением нормативных уровней, оптимизации методов лучевой диагностики для исключения необоснованного облучения летного состава при медицинских обследованиях, а также разработке перспективных конструкторских решений по совершенствованию противорадиационной защиты кабины самолета.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Ушаков И.Б., Зуев В.Г., Абрамов М.М., Солдатов С.К., Галкин А.А., Чернов Ю.Н., Попов В.И. Радиационный риск в авиационных полетах. М.-Воронеж: Истоки, 2001. 44 с.
- Evaluation of the Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew. A Background to Aircrew Dose Evaluation with Results Reported within the EC Contract FIGM-CT-2000-00068 (DOSMAX), Work Package 6. 2000. URL: https://cordis.europa.eu/docs/projects/files/FIGM/FIGM-CT-2000-00068/75331981-6_en.pdf (Date of Access: 15.07.2025).
- Dosimetry of Aircrew Exposure to Radiation during Solar Maximum (DOSMAX). Final Report. Project Summary. Appendix 2. Contract Number: FIGM-CT-2000-00068, 2004. URL: https://cordis.europa.eu/docs/projects/files/FIGM/FIGM-CT-2000-00068/fp5-euratom_dosmax_projsum_en.pdf (Date of Access: 15.07.2025).
- Radiation Protection 140. Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew. Compilation of Measured and Calculated Data. Final Report of Eurados WG 5 to the Group of Experts Established under Article 31 of the Euratom Treaty. European Commission. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2004. 271 p.
- Морозова М.А., Лапшин В.Б., Доренский С.В., Сыроежкин А.В. Дозиметрия при авиаперелётах // Гелиогеофизические исследования. 2014. №10. С. 45–92. EDN SZEIMH.
- Copeland K., Friedberg W. Ionizing Radiation and Radiation Safety in Aerospace Environments. Final Report NoDOT/FAA/AM-21/8. Office of Aerospace Medicine. Washington, DC 20591: Civil Aerospace Medical Institute FAA, March 2021. 57 p. URL: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/data_research/research/med_humanfacs/aeromedical/202108.pdf (Date of Access: 15.07.2025).
- Beck P. Overview of Research on Aircraft Crew Dosimetry during the Last Solar Cycle // Radiation Protection Dosimetry. 2009. Vol.136. No.4. P. 244–250. Doi: 10.1093/rpd/ncp158.
- Maurchev E.A., Shlyk N.S., Dmitriev A.V., Abunina M.A., Didenko K.A., Abunin A.A., Belov A.V. Comparison of Atmospheric Ionization for Solar Proton Events of the Last Three Solar Cycles // Atmosphere. 2024. Vol.15. No.2. P.151. Doi: 10.3390/atmos15020151.
- Белов А.В., Курт В.Г. Солнечные космические лучи // Модель космоса. Т.1. / Под ред. М.И.Панасюка. М.: Книжный дом Университет, 2007. С. 293-313.
- Маурчев Е.А. Программный комплекс RUSCOSMICS в задачах прохождения космических лучей через атмосферу Земли // Труды Кольского научного центра РАН. 2017. Т.8. №7-3. С.10-16. EDN ZXPTKR.
- Бурмистров В.И., Маткевич Е.И., Иванов И.В. Анализ радиационной обстановки при авиационных полетах в условиях солнечных протонных событий // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2025. №3. С. 54-70. Doi: 10.33266/1024-6177-2025-3-54-69.12.
- Ушаков И.Б., Абрамов М.М., Зуев В.Г., Солдатов С.К., Галкин А.А. Радиационный риск при высотных авиационных полетах // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2001. Т.35. №2. С. 64-68.
- Шафиркин А.В., Григорьев Ю.Г., Никитина В.Н. Риск отдаленных последствий хронического воздействия ионизирующей и неионизирующей радиации применительно к гигиеническому нормированию // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2004. Т.38. №1. С. 56-62.
- Маурчев Е.А., Балабин Ю.В. Модельный комплекс для исследования космических лучей // Солнечно-земная физика. 2016. Т.2. №4. С. 3-8. Doi: 10.12737/21289.
- Маурчев Е.А., Михалко Е.А., Германенко А.В., Балабин Ю.В., Гвоздецкий Б.В. Программный комплекс RUSCOSMICS как инструмент для оценки скорости ионизации вещества атмосферы земли протонами космических лучей // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2019. Т.83. №5. С. 712-716. Doi: 10.1134/S0367676519050247.

16. Маурчев Е.А., Германенко А.В., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б. Оценка эквивалентной дозы излучения в режиме реального времени по данным спутника GOES // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Естественные и гуманитарные науки. 2023. Т.2. №2. С. 13–18. Doi: 10.37614/2949-1185.2023.2.2.002.
17. Барсуков О.А. Основы физики атомного ядра // Ядерные технологии. М.: Физматлит, 2011. С. 510-511. Электронный ресурс: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/books/b/Барсуков.pdf> (Дата обращения: 15.07.2025).
18. Положение об особенностях режима рабочего времени и времени отдыха членов экипажей воздушных судов гражданской авиации Российской Федерации: приказ Минтранса России от 21 ноября 2005 г. №139. Ред. от 17.09.2010.
19. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): СП 2.6.1.758-99. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 225 с.
20. Поляков В.М., Агаларов З.С. Методы оптимизации: Учебное пособие. М.: Дашков и К°, 2022. 86 с.
21. ICRP. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60 // Annals of the ICRP. 1991. No.21. P. 1–3.
22. Кларк Р. Меморандум. Эволюция системы радиационной защиты: обоснование необходимости разработки новых рекомендаций МКРП // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2003. Т.48. №4. С. 26–37.
23. Поляков В.М., Агаларов З.С. Методы оценки эффективности управленческих решений: М.: Институт микроэкономики, 2016. 56 с.
24. ВНД на душу населения (среднегодовой показатель в текущей национальной валюте) – Российская Федерация 2020–2023 гг. Данные по национальным счетам Всемирного банка и файлы данных по национальным счетам ОЭСР: Лицензия CC BY-4.0. Электронный ресурс: https://data.worldbank.org/indicator/NY.GNP.PCAP.CD?end=2023&locations=RU&start=2020&year_high_desc=true (Дата обращения 10.04.2025).
25. Рейтинг стран мира по уровню валового национального дохода на душу населения 2024 // Гуманитарный портал: исследования и прогнозы. Центр гуманитарных технологий, 2006–2025. Электронный ресурс: <https://gtmarket.ru/ratings/gross-national-income-ranking> (дата обращения: 10.04.2025).
26. Bartlett D.T. Radiation Protection Aspects of the Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew // Radiation Protection Dosimetry. 2004. Vol.109. No.4. P. 349–355.
27. Положение о медицинском освидетельствовании летного состава авиации Вооруженных Сил Российской Федерации: приказ Министра обороны РФ от 09.10.1999 №455 (Ред. от 19.06.2009).
28. Солдатов С.К., Ушаков И.Б., Лубашев Я.А., Афанасьев Р.В. Основные пути снижения лучевой нагрузки при медицинских обследованиях лиц летного состава // Клинико-функциональная диагностика, профилактика и реабилитация профессионально обусловленных нарушений и субклинических форм заболеваний у летного состава: Практическое руководство по авиационной клинической медицине / Под общ. ред. проф. Р.А.Вартбаронова. М.: АПР, 2011. С. 401-407.
29. Пулик А.В., Харитонов Г.И., Сухачев Ю.В., Иванов Н.В., Охрименко С.Е., Воронин К.В. Лучевые нагрузки пациентов при рентгенографии органов грудной клетки в поликлинике ОАО «Газпром» // Медицинская визуализация. 2005. №1. С. 135-139.
30. Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенорадиологических исследований: Методические рекомендации МР 2.6.1.0215-20. М., 2020. 29 с.
31. Маткевич Е.И., Иванов И.В. Направления снижения дозы облучения космонавтов при диагностической компьютерной томографии // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т.52. №7. С. 154-155.
32. Маткевич Е.И., Синицын В.Е., Зеликман М.И., Кручинин С.А., Иванов И.В. Основные направления снижения дозы облучения пациентов при компьютерной томографии // Российский электронный журнал лучевой диагностики. 2018. Т.8. №3. С. 60-73. Doi: 10.21569/2222-7415-2018-8-3-60-73.
33. Маткевич Е.И., Синицын В.Е., Зеликман М.И., Иванов И.В. Использование корреляционного и факторного анализов для изучения показателей, формирующих дозы облучения пациентов при компьютерной томографии // Радиация и риск (Бюллетень национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2019. Т.28. №1. С. 47-58. Doi: 10.21870/0131-3878-2019-28-1-47-58.
34. Бойко В.И., Демянюк Д.Г., Долматов О.Ю. и др. Использование материалов, полученных в режиме технологического горения, в технике радиационной защиты // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т.308. №5. С. 77–81.
35. Щеголев И.Ю., Емельянов В.М. Эпоксиретановое связующее с увеличенной огнестойкостью, тепло- и термостойкостью: Патент РФ № 2712044. АО Авангард, Российская Федерация. 2020. Бюлл. №3.
36. Пильщиков В.О. Самоклеящиеся эластичные радиационно-защитные покрытия: Дис. ... канд. техн. наук. Саранск, 2021. 137 с.
37. Павленко В.И., Черкашина Н.И., Курицын А.А., Попова Е.В., Умнова Л.А. Высокоэффективный конструкционный полимерный материал для защиты от космической радиации // Пилотируемые полеты в космос. 2022. Т.2. №43. С. 105–115.
38. Аеева К.А., Кузнецов М.В. О возможности использования устойчивого к радиационному воздействию высокомолекулярного полиэтилена в защитных сооружениях гражданской обороны // Технологии гражданской безопасности. 2023. Т.20. №4. С. 26-32.
39. Рябов В.А., Сиксин В.В., Щеголев И.Ю. Формирование защиты для космических аппаратов от нейтронов // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2024. Т.58. №3. С. 89–95.
40. Карташов Д.А., Павленко В.И., Черкашина Н.И., Иванова О.А., Толочек Р.В., Шуришаков В.А. Анализ радиационных нагрузок в каюте МКС при использовании защиты из композитного материала // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2024. Т.58. №5. С. 60-65. Doi: 10.21687/0233-528X-2024-58-5-60-65.
41. Новиков Л.С., Воронина Е.Н. Перспективы применения наноматериалов в космической технике: Учебное пособие. М.: Университетская книга, 2008. 188 с.
42. Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А., Баранников А.А. Современные материалы для салона самолета // Труды ВИАМ. 2021. №9. С. 33-42. Doi: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-33-42. Электронный ресурс: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-materialy-dlya-salona-samoleta> (Дата обращения: 15.07.2025).
43. Тихомиров Г.В. Демонстрация работы в системе иллюстрации ядерных данных JANIS. Получение данных о сечениях ядерных реакций // Образовательный портал НИЯУ МИФИ. Электронный ресурс: <https://online.mephi.ru/mod/page/view.php?id=4797&ysclid=mbqrzoxbам951970897> (Дата обращения: 15.07.2025).
44. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1995. 496 с.
45. Арбузов В.И. Основы радиационного оптического материаловедения: Учебное пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. 284 с.
46. Авиационные правила. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. НЛГ 25. Раздел D. Проектирование и конструкция: 25.841. Герметические кабины. 25.856. Термо/акустические изоляционные материалы. 25.853. Внутренняя отделка кабин. 25.831. Вентиляция. М.: Федеральное агентство воздушного транспорта, 2022. 351 с. Электронный ресурс: <https://favt.gov.ru/public/materials/d/2/a/3/7/d2a37cfd173167e04200b2b872905972.pdf> (дата обращения: 15.07.2025).
47. Санитарно-эпидемиологические требования к отдельным видам транспорта и объектам транспортной инфраструктуры. Раздел III. Санитарно-эпидемиологические требования обеспечения безопасности на воздушном транспорте и отдельных объектах инфраструктуры воздушного транспор-

- та: СП 2.5.3650-20. Утверждены постановлением Главного врача Российской Федерации от 16 октября 2020 г. №30. Электронный ресурс: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/400028956/> (дата обращения: 15.07.2025).
48. Салон пассажирских самолетов. Общие требования: ОСТ 1 02738-93. М., 1993.
 49. Безродных И.П., Казанцев С.Г., Семенов В.Т. Радиационные условия на солнечно-синхронных орбитах в период максимума солнечной активности // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2010. Т.116. №3. С. 23-26.
 50. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // XXI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. Т.2а: Сборник тезисов. Санкт-Петербург, 9-13 сентября, 2019 г. СПб.: Оргкомитет XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии, 2019. С. 24.
- #### REFERENCES
1. Ushakov I.B., Zuyev V.G., Abramov M.M., Soldatov S.K., Galkin A.A., Chernov Yu.N., Popov V.I. *Radiatsionnyy Risk pri Poletakh Aviatsii* = Radiation Risk in Aviation Flights. Moscow-Voronezh, Istoki Publ., 2001. 44 p. (In Russ.).
 2. Evaluation of the Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew. A Background to Aircrew Dose Evaluation with Results Reported within the EC Contract FIGM-CT-2000-00068 (DOSMAX), Work Package 6. 2000. URL: https://cordis.europa.eu/docs/projects/files/FIGM/FIGM-CT-2000-00068/75331981-6_en.pdf (Date of Access. 15.07.2025).
 3. Dosimetry of Aircrew Exposure to Radiation during Solar Maximum (DOSMAX). Final Report. Project Summary. Appendix 2. Contract Number: FIGM-CT-2000-00068, 2004. URL: https://cordis.europa.eu/docs/projects/files/FIGM/FIGM-CT-2000-00068/fp5-euratom_dosmax_projsum_en.pdf (Date of Access. 15.07.2025).
 4. Radiation Protection 140. Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew. Compilation of Measured and Calculated Data. Final Report of Eurados WG 5 to the Group of Experts Established under Article 31 of the Euratom Treaty. European Commission. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, 2004. 271 p.
 5. Morozova M.A., Lapshin V.B., Dorenskiy S.V., Syroyeshkin A.V. Dosimetry during Air Travel. *Geliogeofizicheskiye Issledovaniya* = Heliogeophysical Research. 2014;10:45–92 (In Russ.). EDN SZEIMH.
 6. Copeland K., Friedberg W. Ionizing Radiation and Radiation Safety in Aerospace Environments. Final Report NoDOT/FAA/AM-21/8. Office of Aerospace Medicine. Washington, DC 20591, Civil Aerospace Medical Institute FAA, March 2021. 57 p. URL: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/data_research/research/med_humanfac/aeromedical/202108.pdf (Date of Access: 15.07.2025).
 7. Beck P. Overview of Research on Aircraft Crew Dosimetry during the Last Solar Cycle. *Radiation Protection Dosimetry*. 2009;136;4:244–250. Doi: 10.1093/rpd/ncp158.
 8. Maurchev E.A., Shlyk N.S., Dmitriev A.V., Abunina M.A., Didenko K.A., Abunin A.A., Belov A.V. Comparison of Atmospheric Ionization for Solar Proton Events of the Last Three Solar Cycles. *Atmosphere*. 2024;15;2:151. Doi: 10.3390/atmos15020151.
 9. Belov A.V., Kurt V.G. Solar Cosmic Rays. *Model' Kosmosa* = Model of Space. V.1. Ed. M.I.Panasyuk. Moscow, Knizhnyy Dom Universitet Publ., 2007. P. 293-313 (In Russ.).
 10. Maurchev Ye.A. Software Package RUSCOSMICS in Problems of Cosmic Ray Passage Through the Earth's Atmosphere. *Trudy Kol'skogo Nauchnogo Tsentra RAN* = Proceedings of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences. 2017;8;7-3:10-16 (In Russ.). EDN ZXPTKR.
 11. Burmistrov V.I., Matkevich Ye.I., Ivanov I.V. Analysis of the Radiation Situation during Aviation Flights under Conditions of Solar Proton Events. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2025;3:54-70 (In Russ.). Doi: 10.33266/1024-6177-2025-3-54-69.
 12. Ushakov I.B., Abramov M.M., Zuyev V.G., Soldatov S.K., Galkin A.A. Radiation Risk during High-Altitude Aviation Flights. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* = Aerospace and Environmental Medicine. 2001;35;2:64-68 (In Russ.).
 13. Shafirkin A.V., Grigor'yev Yu.G., Nikitina V.N. Risk of Remote Consequences of Chronic Exposure to Ionizing and Non-Ionizing Radiation in Relation to Hygienic Standardization. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* = Aerospace and Environmental Medicine. 2004;38;1:56-62 (In Russ.).
 14. Maurchev Ye.A., Balabin Yu.V. Model Complex for Studying Cosmic Rays. *Solnechno-Zemnaya Fizika* = Solar-Terrestrial Physics. 2016;2;4:3-8 (In Russ.). Doi: 10.12737/21289.
 15. Maurchev Ye.A., Mikhalko Ye.A., Germanenko A.V., Balabin Yu.V., Gvozdevskiy B.V. The RUSCOSMICS Software Package as a Tool for Assessing the Ionization Rate of the Earth's Atmosphere by Cosmic Ray Protons. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Seriya Fizicheskaya* = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 2019;83;5:712-716 (In Russ.). Doi 10.1134/S0367676519050247.
 16. Maurchev Ye.A., Germanenko A.V., Balabin Yu.V., Gvozdevskiy B.B. Estimation of the Equivalent Dose of Radiation in Real Time Based on GOES Satellite Data. *Trudy Kol'skogo Nauchnogo Tsentra RAN. Yestestvennyye i Gumanitarnyye Nauki* = Proceedings of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences. Natural Sciences and Humanities. 2023;2;2:13–18 (In Russ.). Doi:10.37614/2949-1185.2023.2.2.002.
 17. Barsukov O.A. Fundamentals of Nuclear Physics. *Yadernyye Tekhnologii* = Nuclear Technologies. Moscow, Fizmatlit Publ., 2011. P. 510-511 (In Russ.). URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/books/b/ Barsukov.pdf>. (Date of Accessed: 15.07.2025).
 18. Regulations on the Specifics of the Working Hours and Rest Time of Crew Members of Civil Aviation Aircraft of the Russian Federation. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated November 21, 2005 No.139. Rev. of September 17, 2010 (In Russ.).
 19. *Normy Radiatsionnoy Bezopasnosti (NRB-99/2009)* = Radiation Safety Standards (NRB-99/2009). SP 2.6.1.758-99. Moscow, Federal'nyy Tsentr Gigiyeny i Epidemiologii Rospotrebnadzora Publ., 2009. 225 p. (In Russ.).
 20. Polyakov V.M., Agalarov Z.S. *Metody Optimizatsii* = Optimization Methods. Tutorial. Moscow, Dashkov i K^o Publ., 2022. 86 p. (In Russ.).
 21. ICRP. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Annals of the ICRP*. 1991;21:1-3.
 22. Klark R. Memorandum. Evolution of the Radiation Protection System: Rationale for the Need to Develop new ICRP Recommendations. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2003;48;4:26-37 (In Russ.).
 23. Polyakov V.M., Agalarov Z.S. *Metody Otsenki Effektivnosti Upravlencheskikh Resheniy* = Methods for Assessing the Effectiveness of Management Decisions. Moscow, Institut Mikroekonomiki Publ., 2016. 56 p. (In Russ.).
 24. *VND na Dushu Naseleniya (Srednegodovoy Pokazatel' v Tekushchey Natsional'noy Valyute) - Rossiyskaya Federatsiya 2020 - 2023 gg. Dannyye po Natsional'nyy Schetam Vsemirnogo Banka i Fayly Dannyykh po Natsional'nyy Schetam OESR* = GNI per Capita (Annual Average in Current National Currency) - Russian Federation 2020-2023. World Bank National Accounts Data and OECD National Accounts Data Files. CC BY-4.0 License. URL: https://data.worldbank.org/indicator/NY.GNP.PCAP.CD?end=2023&locations=RU&start=2020&year_high_desc=true (Date of Accessed on 10.04.2025).
 25. *Reyting Stran Mira po Urovnyu Valovogo Natsional'nogo Dokhoda na Dushu Naseleniya 2024* = Ranking of Countries by Gross National Income per Capita 2024. Humanitarian Portal. Research and Forecasts. Tsentr Gumanitarnyykh Tekhnologiy Publ., 2006–2025 (In Russ.). URL: <https://gtmarket.ru/ratings/global-national-income-ranking> (Date of Accessed: 10.04.2025).
 26. Bartlett D.T. Radiation Protection Aspects of the Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew. *Radiation Protection Dosimetry*. 2004;109;4:349 – 355.

27. Regulations on the Medical Examination of Flight Personnel of the Aviation of the ARMED Forces of the Russian Federation. Order of the Minister of Defense of the Russian Federation Dated 09.10.1999. No.455 (Amended on 19.06.2009) (In Russ.).
28. Soldatov S.K., Ushakov I.B., Lubashev Ya.A., Afanas'yev R.V. Main Ways to Reduce Radiation Exposure during Medical Examinations of Flight Personnel. *Kliniko-Funktsional'naya Diagnostika, Profilaktika i Reabilitatsiya Professional'no Obuslovlennykh Narusheniy i Subklinicheskikh form Zabolvaniy u Letnogo Sostava* = Clinical and Functional Diagnostics, Prevention and Rehabilitation of Occupationally Conditioned Disorders and Subclinical Forms of Diseases in Flight Personnel. Practical Guide to Aviation Clinical Medicine. Ed. R.A.Vartbaronov. Moscow, APR Publ., 2011. P. 401-407 (In Russ.).
29. Pulik A.V., Kharitonov G.I., Sukhachev Yu.V., Ivanov N.V., Okhrimenko S.Ye., Voronin K.V. Radiation Loads of Patients during Chest Radiography in the Gazprom Outpatient Clinic. *Meditsinskaya Vizualizatsiya* = Medical Visualization. 2005;1:135-139 (In Russ.).
30. *Otsenka Radiatsionnogo Riska u Patsiyentov pri Provedenii Rentgenoradiologicheskikh Issledovaniy* = Assessment of Radiation Risk in Patients during X-Ray and Radiological Examinations. Methodological Recommendations MR 2.6.1.0215-20. Moscow Publ., 2020. 29 p. (In Russ.).
31. Matkevich Ye.I., Ivanov I.V. Directions for Reducing the Radiation Dose of Cosmonauts during Diagnostic Computed Tomography. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* = Aerospace and Environmental Medicine. 2018;52;7:154-155 (In Russ.).
32. Matkevich Ye.I., Sinitsyn V.Ye., Zelikman M.I., Kruchinin S.A., Ivanov I.V. Main Directions of Reducing the Radiation Dose of Patients during Computed Tomography. *Rossiyskiy Elektronnyy Zhurnal Luchevoy Diagnostiki* = Russian Electronic Journal of Radiology (REJR). 2018;8;3:60-73 (In Russ.). Doi: 10.21569/2222-7415-2018-8-3-60-73.
33. Matkevich Ye.I., Sinitsyn V.Ye., Zelikman M.I., Ivanov I.V. Use of Correlation and Factor Analysis to Study Indicators that Form Radiation Doses of Patients during Computed Tomography. *Radiatsiya i Risk (Byulleten' Natsional'nogo Radiatsionno-Epidemiologicheskogo Registra)* = Radiation and Risk. 2019;28;1:47-58 (In Russ.). Doi: 10.21870/0131-3878-2019-28-1-47-58.
34. Boyko V.I., Demyanyuk D.G., Dolmatov O.Yu., et al. Use of Materials Obtained in the Technological Combustion Mode in Radiation Protection Technology. *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta* = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2005;308;5:77-81 (In Russ.).
35. Shchegolev I.Yu., Yemel'yanov V.M. *Epoksiuretanovoye Svyazyushcheye s Uvelichennoy Ognestoykost'yu, Teplo- i Termostoykost'yu* = Epoxyurethane Binder with Increased Fire Resistance, Heat and Thermal Stability. Russian Federation Patent No. 2712044. Avangard JSC, Russian Federation. 2020. Bulletin No.3 (In Russ.).
36. Pil'shchikov V.O. *Samokleyashchiyesa Elastichnyye Radiatsionno-Zashchitnyye Pokrytiya* = Self-Adhesive Elastic Radiation-Protective Coatings. Candidate's Thesis (Technical). Saransk Publ., 2021. 137 p. (In Russ.).
37. Pavlenko V.I., Cherkashina N.I., Kuritsyn A.A., Popova Ye.V., Umnova L.A. Highly Effective Structural Polymer Material for Protection Against Cosmic Radiation. *Pilotiruyemye Polety v Kosmos* = Manned Spaceflight. 2022;2;43:105-115 (In Russ.).
38. Ageyeva K.A., Kuznetsov M.V. On the Possibility of Using Radiation-Resistant High-Molecular Polyethylene in Civil Defense Protective Structures. *Tekhnologii Grazhdanskoj Bezopasnosti* = Civil Security Technologies. 2023;20;4:26-32 (In Russ.).
39. Ryabov V.A., Siksin V.V., Shchegolev I.Yu. Formation of Protection for Spacecraft from Neutrons. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* = Aerospace and Environmental Medicine. 2024;58;3:89-95 (In Russ.).
40. Kartashov D.A., Pavlenko V.I., Cherkashina N.I., Ivanova O.A., Tolochek R.V., Shurshakov V.A. Analysis of Radiation Loads in the ISS Cabin Using Composite Material Protection. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* = Aerospace and Environmental Medicine. 2024;58;5:60-65 (In Russ.). Doi: 10.21687/0233-528X-2024-58-5-60-65.
41. Novikov L.S., Voronina Ye.N. *Perspektivy Primeneniya Nanomaterialov v Kosmicheskoy Tekhnike* = Prospects for the Application of Nanomaterials in Space Technology. A Tutorial. Moscow, Universitetskaya Kniga Publ., 2008. 188 p. (In Russ.).
42. Veshkin Ye.A., Satdinov R.A., Barannikov A.A. Modern Materials for the Aircraft Cabin. *Trudy VIAM* = Proceedings of VIAM. 2021;9:33-42 (In Russ.). Doi: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-33-42. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-materialy-dlya-salona-samoleta> (Date of Access: 15.07.2025).
43. Tikhomirov G.V. Demonstration of Work in the JANIS Nuclear Data Illustration System. Obtaining Data on Nuclear Reaction Cross-Sections. *Obrazovatel'nyy Portal NIYAU MIFI* = Educational Portal of NRNU MEPhI (In Russ.). URL: <https://online.mephi.ru/mod/page/view.php?id=4797&ysclid=m6qrzox6am951970897> (Accessed: 15.07.2025).
44. Mashkovich V.P., Kudryavtseva A.V. *Zashchita ot Ioniziruyushchikh Izlucheniy* = Protection from Ionizing Radiation. Handbook. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995. 496 p. (In Russ.).
45. Arbutov V.I. *Osnovy Radiatsionnogo Opticheskogo Materialovedeniya* = Fundamentals of Radiation Optical Materials Science. Textbook. St. Petersburg, SPbGU Institut Informatsionnykh Tekhnologiy, Mekhaniki i Optiki Publ., 2008. 284 p. (In Russ.).
46. *Aviatsionnyye Pravila* = Aviation Regulations. Part 25. Airworthiness Standards for Transport Category Airplanes. NLG 25. Section D. Design and Construction: 25.841. Pressurized Cabins. 25.856. Thermal/Acoustic Insulating Materials. 25.853. Cabin Interior Trim. 25.831. Ventilation. Moscow, Federal'noye Agentstvo Vozdushnogo Transporta Publ., 2022. 351 p. (In Russ.). URL: <https://favt.gov.ru/public/materials/d/2/a/3/7/d2a37cfd173167e04200b2b872905972.pdf> (accessed: 15.07.2025).
47. Sanitary and Epidemiological Requirements for Certain Types of Transport and Transport Infrastructure Facilities. Section III. Sanitary and Epidemiological Requirements for Ensuring Safety in Air Transport and Certain Air Transport Infrastructure Facilities. SP 2.5.3650-20. Approved by the Resolution of the Chief Physician of the Russian Federation. Dated October 16, 2020 No. 30. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/400028956/> (date of access: 15.07.2025). (In Russ.).
48. *Salon Passazhirskikh Samoletov. Obshchiye Trebovaniya* = Passenger Aircraft Cabin. General Requirements. OST 1 02738-93. Moscow Publ., 1993 (In Russ.).
49. Bezrodnykh I.P., Kazantsev C.G., Semenov V.T. Radiation Conditions on Sun-Synchronous Orbits during the Period of Maximum Solar Activity. *Voprosy Elektromekhaniki. Trudy VNIIEM* = Electromechanical Matters. VNIIEM Studies. 2010;116;3:23-26 (In Russ.).
50. Kablov Ye.N. The Role of Fundamental Research in the Creation of New Generation Materials. *XXI Mendeleevskiy S'yezd po Obschey i Prikladnoy Khimii* = XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry. Vol. 2a. Collection of Abstracts. St. Petersburg, September 9-13, 2019. St. Petersburg, Orgkomitet KHKHI Mendeleevskogo S'yezda po Obschey i Prikladnoy Khimii Publ., 2019. P. 24. (In Russ.).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.
Поступила: 20.07.2025. Принята к публикации: 25.08.2025.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
Financing. The study had no sponsorship.
Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.
Article received: 20.07.2025. Accepted for publication: 25.08.2025.