В.И. Бурмистров¹, Е.И. Маткевич², И.В. Иванов^{1, 3}

АНАЛИЗ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ ПРИ АВИАЦИОННЫХ ПОЛЕТАХ В УСЛОВИЯХ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ

¹ Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова, Москва ² Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

³ Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова, Москва

Контактное лицо: И.В. Иванов, e-mail: ivanov-iv@yandex.ru

РЕЗЮМЕ

При общем анализе уровней ионизирующего излучения, характерных для космического пространства и обусловливающих факторы радиационной опасности для космонавтов, вопросы оценки радиационной обстановки в авиаперелетах также остаются попрежнему актуальными. Цель исследования состояла в анализе видов и характеристик ионизирующего излучения в воздушном пространстве до высот 20 км над Землёй и возможных доз облучения летного состава при полетах в этих условиях. Проанализированы состав ионизирующего излучения и энергетические характеристики протонных событий. Оценены мощности доз излучения в зависимости от высоты и географической широты полета. Для минимизации облучения летного состава и пострадиационных рисков важно систематически учитывать прогноз солнечной активности, высоту и географическую широту полета, контролировать общее время полетов в год, условия противорадиационной защиты и другие факторы.

Ключевые слова: авиационные полеты, летный состав, гражданская авиация, радиационная обстановка, солнечная активность, протонные события, дозы излучения, дозиметрия, противорадиационная защита

Для цитирования: 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. Т. 70. № 3. С. 54–69. DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-3-54-69

DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-3-54-69

V.I. Burmistrov¹, E.I. Matkevich², I.V. Ivanov^{1, 3}

Analysis of the Radiation Situation in Aviation Flights under Conditions of Solar Proton Events

¹ I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russia

² A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

³ N.F. Izmerov Research Institute of Occupational Medicine, Moscow, Russia

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

ABSTRACT

With a general analysis of the levels of ionizing radiation characteristic of outer space and causing radiation hazard factors for astronauts, the issues of assessing the radiation situation in air travel also remain relevant. The purpose of the study was to analyze the types and characteristics of ionizing radiation in airspace up to heights of 20 km above the Ground and possible radiation doses to flight personnel during flights under these conditions. The composition of ionizing radiation and the energy characteristics of proton events are analyzed. The radiation dose rates are estimated depending on the altitude and geographical latitude of the flight. To minimize the exposure of flight personnel and radiation risks, it is important to systematically take into account the forecast of solar activity, altitude and latitude of flight, control the total flight time per year, radiation protection conditions and other factors.

Keywords: aviation flights, flight personnel, civil aviation, radiation situation, solar activity, proton events, radiation doses, dosimetry, anti-radiation protection

For citation: Burmistrov VI, Matkevich EI, Ivanov IV. Analysis of the Radiation Situation in Aviation Flights under Conditions of Solar Proton Events. Medical Radiology and Radiation Safety. 2025;70(3):54–69. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-3-54-69

Актуальность

В рамках анализа уровней ионизирующего излучения, характерных для космического пространства и обусловливающих факторы радиационной опасности для космонавтов, вопросы оценки радиационной обстановки в авиаперелетах также остаются по-прежнему актуальными.

Согласно литературным данным, на высоте эшелонов гражданских рейсов (9–12 км) мощность эквивалентной дозы вследствие влияния галактических и солнечных космических лучей в среднем составляет от нескольких

до 10 мкЗв/ч в зависимости от высоты, геомагнитной широты и солнечной активности [1–6]. В среднем годовая эквивалентная доза, как правило, составляет 1–2 мЗв для тех членов экипажей, которые летают на малые расстояния, и 3–5 мЗв для тех, кто обслуживает дальнемагистральные рейсы [7].

Однако до настоящего времени в такого рода исследованиях преобладают замеры мощности и доз излучений при авиационных полетах в период низкой солнечной активности и прогностические модельные оценки для периода высокой солнечной активности, но недостаточно измерений и оценок этих величин в период реальных солнечных протонных событий.

Цель исследования состояла в анализе видов и характеристик ионизирующего излучения в воздушном пространстве до высот 20 км над Землёй при разных уровнях солнечной вспышечной активности и возможных доз облучения летного состава при полетах в этих условиях.

Материал и методы

Основные этапы исследования включали:

- 1) Оценку доз ионизирующего излучения в полетах Москва-Минеральные воды, Москва-Симферополь по измерениям дозиметра-радиометра.
- 2) Анализ многолетней динамики вспышечной активности Солнца и последствий его радиационного воздействия на Землю.
- 3) Сравнение изменения мощности дозы ионизирующего излучения на широтах от экватора до Северного полюса в Северном полушарии в момент солнечного протонного события 8 июня 2024 г. и в период низкой вспышечной активности Солнца 8 июля 2024 г.
- 4) Расчет доз облучения летного состава при авиационных полетах в меридиональных и широтных направлениях при высокой и низкой вспышечной активности Солнца.

На данных этапах применяли следующие методики.

1. Для оценки доз ионизирующего излучения в полетах Москва-Минеральные воды, Москва-Симферополь использовали дозиметр-радиометр «ЭКОЛОГ супер» производства ООО «РОСТЕХНИКА» г. Санкт-Петербург (https://rosstehnika.ru/item.php?id=28). Измерение проводили в режиме регистрации мощности амбиентной эквивалентной дозы (МАЭД) в мкЗв/час. Энергетическая зависимость чувствительности прибора (относительно радионуклида ¹³⁷Сs) в диапазоне энергий от 30 кэВ до 3 МэВ от энергии излучения – менее 25 %; диапазон энергий фотонов (гамма-излучения) 30 кэВ -3 МэВ; диапазон измерений экспозиционной дозы фотонного (гамма) излучения - от 0,001 до 999,9 мР. Относительная погрешность измерений экспозиционной дозы в поле излучения при p = 0.95 % в диапазоне МЭД 10–9999 мкР/ч – не более 15 %. Этот дозиметр позволяет регистрировать также альфа- и бета-излучение, но оно задерживается обшивкой самолета и на человека не воздействует.

2. При анализе динамики вспышечной активности Солнца использовали данные наблюдений SOLAR CYCLE PROGRESSION с сайта Space Weather Prediction https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-Center progression.

Солнечные вспышки делят на классы А, В, С, М и Х:

- вспышки классов А и В остаются практически незамеченными;
- вспышки С-класса едва заметные, с незначительными последствиями;
- вспышки М-класса сопровождаются повышением уровней радиации, вызывают короткие перебои радиосвязи в полярных регионах, иногда являются катализаторами магнитных бурь;
- вспышки Х-класса сопровождаются значительным повышением уровней радиации, вызывают радиопомехи по всей Земле и сильные магнитные бури.

Вспышка каждого класса делится на 9 уровней в диапазоне от 1 до 9 по логарифмической шкале.

3. При изучении закономерностей изменения мощности дозы ионизирующего излучения на широтах от экватора до Северного полюса в Северном полушарии Radiation safety

в период высокой и низкой вспышечной активности Солнца использовали данные модели RUSCOSMICS, разработанные сотрудниками Полярного геофизического института РАН, Центра прогнозов космической погоды Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗ-МИРАН) с сайта https://www.ruscosmics.ru/ (2013-2024 г. © Маурчев Евгений, Диденко Ксения) [8, 9]. При сравнении данных, полученных по модели, с экспериментальными данными замеров отмечено хорошее согласие с отклонениями ~10– $2\overline{0}$ % от среднего [8, 10].

Значения мощности эквивалентной дозы (мкЗв/час) получали с карты расчетов эквивалентной дозы излучения (рис. 1), которая выдается в режиме реального времени с использованием модели прохождения космических лучей через атмосферу Земли и данных первичного спектра протонов со спутников GOES, размещенных на геостационарной орбите на удалении от Земли 35786 км. Исходными значениями служили высота над уровнем моря от 1 до 20 км и географическая широта в интервалах 0-30, 31-60 и 61-90 градусов северной широты.

4. При расчете доз облучения летного состава за авиационные полёты в меридиональных и широтных направлениях при высокой и низкой вспышечной активности Солнца использовали значения мощности эквивалентной дозы (мкЗв/час) с карты эквивалентной дозы (рис. 1) в реальном режиме времени на задаваемой высоте.

Для унификации расчетов исходили из крейсерского эшелона полетов 11-12 км для современных гражданских авиалайнеров семейств Airbus A320, Boeing 737, а также Ил-62 и Ту-154. 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 с крейсерской высоты и посадке.

Результаты

1. Оценка доз ионизирующего излучения в полетах Москва – Симферополь и Москва – Минеральные воды по данным дозиметрических измерений

По измерениям дозиметра-радиометра «ЭКОЛОГ супер» максимальная мощность дозы на крейсерском эшелоне авиаперелёта Москва-Симферополь 25 сентября 2021 г. составила 1,38 мкЗв/час, суммарная накопленная доза за 2 ч полёта 0,220 мР или 1,93 мкЗв (рис. 2).

Авиаперелет Москва (Шереметьево) – Минеральные воды 18 мая 2022 г. Airbus А-320 осуществлялся по удлиненному маршруту (рис. 3А, 4) через аэропорт Актау на полуострове Мангышлак. При расчетном времени полёта по прямой дистанции (рис. 3Б, расстояние 1321 км) 1ч 39 мин полёт по удлиненному маршруту через полуостров Мангышлак продолжался в течение 3ч 30 мин, то есть в 2,1 раза дольше, чем по прямому маршруту. По измерениям дозиметра-радиометра «ЭКОЛОГ супер» максимальная мощность дозы на крейсерском эшелоне авиаперелёта составила 1,82 мкЗв/ч, суммарная накопленная доза – 0,485 мР или 4,25 мкЗв (рис. 5).

2. Анализ динамики вспышечной активности Солнца и последствий его радиационного воздействия на Землю

Известно, что у Солнца есть свой цикл активности, который длится около 11 лет. О динамике этой активности судят по образованию на поверхности звезды пятен – областей скопления сильных магнитных полей. В этом



Рис. 1. Значения мощности эквивалентной дозы (мкЗв/час) с карты эквивалентной дозы (https://www.ruscosmics.ru/) 8.06.2024 (A) и 8.07.2024 (Б). По левой оси ординат – градусы северной и южной широты, по правой оси ординат – мощность эквивалентной дозы, мкЗв/час, по оси абсцисс – градусы долготы





Рис. 2. Мощность дозы излучения (мкЗв/ч) и суммарная доза (мР) за авиаперелет Москва – Симферополь 25.09.2021 по данным измерений дозиметра-радиометра «ЭКОЛОГ супер». По оси абсцисс – продолжительность полета, минуты Fig. 2. Radiation dose rate (µSv/hr) and total dose (mR) for the flight Moscow – Simferopol 09/25/2021 according to measurements of the ECOLOG Super dosimeter-radiometer. On the axis of the abscissa is the duration of the flight, minutes



Рис. 3. Авиаперелёт Москва–Минеральные воды: А – по маршруту авиаперелета 18 мая 2022 г., Б – по стандартному маршруту Fig. 3. Flight Moscow–Mineralnye Vody: A – on the flight route on May 18, 2022, Б – on the standard route

АЭРОФЛОТ	
Номер рейса	AFL1312
Дата	18/05/2022
Местное время в пункте назначения	13:01
Местное время в пункте отправления	13:01
Время до места назначения	0:44
Примерное время прибытия	13:45
Расстояние до пункта назначения	536 км
Скорость	733 км/ч
Высота над уровнем моря	10,955 м
Температура за бортом	-60 °C

Рис. 4. Характеристики маршрута рейса AFL1312 (Москва-Шереметьево – Минеральные воды) 18 мая 2022 г. за 44 мин до прибытия в аэропорт Минеральные воды по данным сайта Flightradar24

Fig. 4. Characteristics of the AFL1312 (Moscow Sheremetyevo – Mineralnye Vody) flight route on May 18, 2022, 44 minutes before arrival at Mineralnye Vody Airport according to the Flightradar24 website месте происходят взрывоопасные процессы, их и называют солнечными вспышками. Динамика числа солнечных пятен с 1 по 25 солнечные циклы показана на рис. 6.

К середине 2024 г. в ходе текущего 25-го одиннадцатилетнего солнечного цикла активность Солнца приблизилась к своему максимуму (рис. 7, 8). На Солнце происходят мощные вспышки, сопровождаемые потоками вещества, главным образом протонов, в межпланетную среду. Весна и лето 2024 г. на Земле оказались периодом солнечных штормов – таких сильных солнечных событий и вызванных ими магнитных бурь не наблюдали в течение многих лет.

Источниками естественного ионизирующего излучения на поверхности Земли и в атмосфере являются галактические (ГКЛ) и солнечные (СКЛ) космические лучи.

По своему составу ГКЛ состоят из потоков высокоэнергетичных заряженных частиц от звезд и туманностей нашей Вселенной, движущихся со скоростями, близки-



Puc. 5. Мощность дозы излучения (мкЗв/ч), суммарная доза (мР) и высота полета (км) за авиаперелёт Москва – Минеральные воды 18.05.2022 по данным измерений дозиметра-радиометра «ЭКОЛОГ супер». По оси абсцисс – продолжительность полета, минуты
 Fig. 5. Radiation dose rate (µSv/hr), total dose (mR) and flight altitude (km) for the flight Moscow – Mineralnye Vody 05/18/2022 according to measurements of the ECOLOG-Super dosimeter-radiometer. On the axis of the abscissa is the duration of the flight, minutes





Рис. 6. Прогрессия числа солнечных пятен, зарегистрированных с 1-го по 25-й солнечные циклы Fig. 6. The progression of the number of sunspots recorded

from 1 to 25 solar cycles

ми к скорости света, на ~92 % они состоят из протонов, на ~6 % – из ядер гелия, около 1 % составляют атомы более тяжелых элементов до урана и около 1 % приходится на электроны; для ГКЛ характерны высокие энергии – от 10⁷ эВ (10 МэВ) до 10²⁰ эВ (10¹⁰ ГэВ) [11–15].

СКЛ образуются в результате мощных краткосрочных вспышек на поверхности Солнца, порождающих солнечные протонные события. Они представляют собой интенсивные потоки высокоэнергетических заряженных частиц, в состав которых входят протоны, ядра гелия и тяжелых элементов, электроны, инжектированные Солнцем в межпланетное пространство, но с меньшей энергией, чем ГКЛ – от нескольких МэВ до нескольких ГэВ [15, 16].

При оценках радиационной опасности от ГКЛ и СКЛ учитывают высокую проникающую способность этих частиц и эффект их каскадного размножения (вторичного излучения) в средах и материалах. При этом потоки первичных космических лучей проникают в атмосферу Земли и сталкиваются с молекулами и атомами воздуха. Столкновения приводят к образованию большого количества вторичных энергичных частиц (нейтронов, пионов, мюонов и др). Это порождает каскад вторичных космических лучей. По мере проникновения все глубже в атмосферу каскадный процесс



Рис. 7. Вспышечная активность солнца в 24-ом и 25-ом солнечных циклах по показателю прогрессии числа солнечных пятен Fig. 7. Solar flare activity in the 24th and 25th solar cycles in terms of the progression of the number of sunspots



Рис. 8. Вспышечная активность солнца в 24-ом и 25-ом солнечных циклах по показателю прогрессии радиопотока F10,7 со спутника ISES Fig. 8. Solar flare activity in the 24th and 25th solar cycles as measured by the progression of the F10.7 radio stream from the ISES satellite



Рис. 9. Эффект каскада ионизирующего излучения в верхних слоях атмосферы. Условные обозначения: электромагнитное излучение – e⁺, e⁻, γ, нуклонное излучение – N, p, n, α, мезонное излучение – пи-мезоны (π⁺, π⁻, π⁰), мю-мезоны (μ⁻, μ⁺, μ[±]), ν – фотоны. Источник – кафедра физики космоса МГУ им. М.В.Ломоносова: https://space.phys.msu.ru/wp-content/uploads/2021/09/00_W70FAXz.original1.jpg

Fig. 9. The effect of a cascade of ionizing radiation in the upper atmosphere. Symbols: electromagnetic radiation $-e^+$, e^- , γ , nucleon radiation -N, p, n, α , meson radiation $-p^-$, $meson (\pi^-, \pi^-, \pi^0)$, mu mesons (μ^-, μ^+, μ^+), ν – photons. Source - Department of Space Physics, Lomonosov Moscow State University

последовательной генерации вторичного ионизирующего излучения усиливается, достигая максимума на высотах от 12 до 30 км над уровнем моря. Этот процесс нарастания числа частиц и фотонов продолжается до снижении их энергии из-за потерь на ионизацию и возбуждение атомов и молекул воздуха. Поэтому чем глубже частицы проникают в атмосферу, тем больше энергии они теряют. Как видно (рис. 9), максимальный эффект каскада и генерации разных видов ионизирующего излучения развивается в верхних слоях атмосферы на высотах от 9 до 30 км, так как здесь очень высока энергия космических частиц и атмосфера уже достаточно насыщена молекулами кислорода и азота. На больших высотах в ней ещё недостаточно атомов для распада под воздействием космических частиц, а по мере приближения к поверхности Земли энергия этих частиц резко падает, так как теряется на взаимодействия с атомами атмосферы [5].

На рис. 9 представлена лишь упрощенная схема, однако высота над Землёй расположения максимумов развития каскадов частиц, образованных в результате прохождения первичных протонов через атмосферу Земли, зависит от многих факторов.

Во-первых, от энергии частиц космических излучений, так частицы ГКЛ и СКЛ с энергиями от 10 до 100 МэВ теряют свою энергию на образование ионных пар на высотах от 50 до 100 км. Лишь первичные галактические космические лучи с энергией свыше 0,5 ГэВ проникают до высот 10–13 км над уровнем моря, где генерируют значительное число вторичных частиц (рис. 10), некоторые из которых могут достигать уровня моря и определяют фон излучения на поверхности Земли.

Во-вторых, от анизотропии атмосферы Земли для потоков космического излучения: максимумы каскада регистрируются в случае их падения перпендикулярно к поверхности Земли на уровне 11–13 км, в случае падения под углом – на уровнях 15–30 км (рис. 11). Высокоэнергетическая часть ГКЛ (0,5–100 ГэВ) в атмосфере Земли практически не меняется, в то время как его низкоэнергетическая часть (10–500 МэВ) может изменяться в определенных пределах [15]. Для низкоэнергетической части спектра ГКЛ максимальные потоки наблюдаются во время минимумов солнечной активности, а минимальные потоки – во время максимумов солнечной активности, чему способствует увеличение защиты от ГКЛ усиленного в эти периоды солнечного магнитного поля. Однако наряду с воздействием протонов ГКЛ на



Рис. 10. Визуализация моделирования прохождения единичного протона с энергией 100 ГэВ через слои вещества атмосферы и образования каскада частиц [17].

Условные обозначения: показаны высота над уровнем моря (км), частицы вторичного излучения обозначены – синим цветом – положительно заряженные, красным цветом – отрицательно заряженные, зеленым цветом – нейтральные.

Fig. 10. Visualization of modeling the passage of a single proton with an energy of 100 GeV through the layers of atmospheric matter and the formation of a cascade of particles [17].

Symbols: the height above sea level (km) is shown, the secondary particles are indicated in blue as positively charged, in red as negatively charged, and in green as neutral.



Рис. 11. Пример переноса частиц ГКЛ через атмосферу Земли с использованием геометрии модели RUSCOSMICS [15], proton sourse – первичный источник протонов, который определяется как точечный источник с анизотропным угловым распределением и отслеживанием вторичных частиц. Атмосфера Земли разделена на слои над уровнем моря (Altitude) и параметризована с помощью модели NRLMSISE-00.

Условные обозначения: по оси ординат – высота над уровнем моря, км, красный цвет обозначает положительно заряженные частицы, синий – отрицательно заряженные частицы, зеленый – нейтроны, желтый – фотоны

Fig. 11. An example of the transfer of HCL particles through the Earth's atmosphere using the geometry of the RUSCOSMICS model [15], proton source is the primary source of protons, which is defined as a point source with an anisotropic angular distribution and tracking of secondary particles. The Earth's atmosphere is divided into layers above sea level (Altitude) and parameterized using the NRLMSISE-00 model.

Symbols: on the ordinate axis, the height above sea level, km, red indicates positively charged particles, blue indicates negatively charged particles, green indicates neutrons, and yellow indicates photons

атмосферу Земли можно выделить относительно кратковременные явления солнечной активности – события SEP (solar energy particle = частицы солнечной энергии) и GLE (ground level enhancement = повышение основного уровня у Земли), которые также могут оказывать существенное влияние на состояние атмосферы [18–20].

События SEP характеризуются потоком частиц с относительно мягким энергетическим спектром (10–100 МэВ). Это означает, что протоны во время таких событий не могут генерировать каскады и оказывать значительное влияние на нижние слои атмосферы (от уровня моря до ~30 км). SEP приводят к увеличению ионизации лишь в верхних слоях атмосферы Земли (от 30 км до 100 км) и могут влиять на ее свойства в высоких широтах и в полярных районах.

События GLE происходят реже, чем SEP, однако во время них энергетический спектр включает протоны с энергиями до 10 ГэВ и их потоки могут превышать уровень ГКЛ. Поэтому, как и в случае с ГКЛ, такие высокоэнергетические протоны СКЛ могут взаимодействовать в плотных слоях атмосферы Земли на высотах до 20 км с ядрами воздуха (в основном азота и кислорода), вызывая каскады вторичных частиц. Некоторые из этих частиц (такие как нейтроны, фотоны и мюоны) обладают достаточной энергией, а также большой длиной свободного пробега, что позволяет им достичь уровня моря. Во время таких событий уровни мощности дозы излучений на высотах 12-17 км над уровнем моря значительно возрастают [21]. Индуцированные протонами высоких энергий вторичные частицы и усиление нейтронного потока могут быть зарегистрированы нейтронными мониторами или другими детекторами частиц на поверхности Земли, наблюдаемое при этом увеличение скорости счета привело к названию этого явления – GLE (ground-level enhancement – повышение земного уровня).

Таким образом, по расчетным данным на высотах от 10 до 13 км, где проходят трассы гражданских воздушных судов внутренних и международных рейсов, даже при спокойной геофизической обстановке мощность эквивалентной дозы составляет от 1,7 до 10 мкЗв/час, что значительно выше, чем на поверхности Земли [1, 4–6]. При очень сильных солнечных вспышках мощность дозы может превышать 1000 мкЗв/час. Например, при мощной солнечной вспышке класса X7.1 произошедшей 20.01.2005 г., мощность эквивалентной дозы на высоте 9 тыс. м в области южного полюса (70 ° ЮШ) в течении 10 мин достигала 3000 мкЗв/час [22].

3. Изучение закономерностей изменения мощности дозы ионизирующего излучения в Северном полушарии на широтах от экватора до Северного полюса в периоды высокой вспышечной активности Солнца 8 июня 2024 г. и низкой вспышечной активности Солнца 8 июля 2024 г.

Как указывается на сайте ИКИ РАН, по данным спутникового мониторирования по Земле 8 июня 2024 г. около 6 утра был нанесён удар солнечной вспышкой М 9.7 близкой к X классу, произошедшей с 4:23 до 5:19 ч в активной области 3697 (рис. 12). Область находилась на осевой линии Солнце-Земля и постепенно удалялась от этой линии.

В первую фазу вспышки произошёл выброс тяжёлых частиц (главным образом протонов очень высоких энергий – от 10 до 100 МэВ). В течение нескольких часов



Рис. 12. График вспышечной активности Солнца 8 и 9 июня 2024 г. по данным замеров спутника GOES-16 мощности рентгеновского излучения Солнца. По левой оси ординат – рентгеновский поток, Вт/м², по правой оси ординат – класс солнечной вспышки, по оси абсцисс – универсальное время+3 ч

Fig. 12. Graph of solar flare activity on June 8 and 9, 2024 according to the GOES-16 satellite measurements of the X-ray power of the Sun. On the left ordinate axis is the X-ray flux, W/m², on the right ordinate axis is the solar flare class, on the abscissa axis is the universal time+3 hr

потоки этих частиц были повышены примерно в 10 тыс. раз по сравнению с обычными значениями, и оставались на повышенном уровне ещё 2–3 сут. Протоны таких энергий имеют скорости всего лишь в несколько раз ниже скорости света и доходят до Земли за время около 2 ч, обусловливая повышение радиационного фона в околоземном космическом пространстве.

Во вторую фазу после солнечной вспышки более медленным плазменным облакам (солнечной плазме) требуется около двух суток, чтобы достигнуть Земли. Это вызвало вторую отсроченную фазу вспышки М9.7 через двое сут. Обычно вторая фаза сопровождается магнитными бурями. Однако выброс массы (плазменный поток) от вспышки М9.7 от 8 июня прошёл около 19–30 ч 10 мая мимо нашей планеты, задев Землю лишь своим краем с минимальными последствиями в виде слабых геомагнитных возмущений.

Чтобы оказывать максимальное воздействие на Землю, солнечные вспышечные центры должны находиться на прямой линии Солнце–Земля. Так, активные центры мощных солнечных вспышек 10 июня 2024 г. МЗ.31, X1.55 и М9.56 (рис. 13) не имели возможность наносить удары по Земле, так как не проходили через линию Солнце–Земля.

При изучении особенностей радиационного воздействия в период высокой вспышечной активности Солнца проанализированы значения мощности дозы в Северном полушарии на широтах от экватора до Северного полюса в период максимума значений (9 ч 8 июня 2024 г.) на высотах от 1 до 20 км (рис. 14). Как видно, значения мощности дозы от 70 до 90 ° СШ превышали значения над экватором до 50 раз раз и были максимальны на высотах от 12 до 15 км, достигая 99 мкЗв/ч.

Вспышка 3697 (М9.75) на Солнце 8 июня 2024 г. продолжалась с 1 ч 23 мин до 2 ч 19 мин по среднеевропейскому времени или с 4 ч 23 мин до 5 ч 19 мин по московскому времени, то есть в течение 1 часа, в течение 2 часов она достигла Земли. Изучение динамики радиационных событий (рис. 15, 16), показало, что в течение 3 ч после достижения первой фазы солнечной вспышки 8 июня 2024 г. атмосферы Земли на всех высотах наблюдалось резкое увеличение мощности дозы излучения, повышенный уровень сохранялся до 13 ч, то есть в течение около 7 ч, пока не реализовался потенциал высо-



Рис. 13. График вспышечной активности Солнца 10 и 11 июня 2024 г. по данным замеров спутником GOES-16 мощности рентгеновского излучения Солнца. По левой оси ординат – рентгеновский поток, Вт/м², по правой оси ординат – класс солнечной вспышки, по оси абсцисс – универсальное время +3 ч

Fig. 13. Graph of solar flare activity on June 10 and 11, 2024 according to the GOES-16 satellite measurements of the Solar X-ray power. On the left ordinate axis is the X-ray flux, W/m², on the right ordinate axis is the solar flare class, on the abscissa axis is the universal time+3 hr коэнергетических заряженных частиц, прилетевших к Земле от этой солнечной вспышки. При этом на высотах 12–17 км мощность дозы излучения была больше, чем на высоте 1 км от 50 раз для широты Минеральных Вод до 300 раз для широты Мурманска.

Динамика нарастания и спада мощности излучения аналогична для проанализированных трех широт (Мурманск, Москва, Минеральные воды). В последующем наблюдали небольшие «всплески» мощности дозы в 17:05 и в 19:40, характерные для всех широт. Отмечены определенные различия в динамике мощности дозы на различных высотах для широты Мурманска, связанные с особенностями вторичной ионизации молекул воздуха в зависимости от состава атмосферы на разных высотах и с потерей энергии космических частиц на эти процессы по мере их приближения к поверхности Земли: в течение первого получаса (с 8:40 до 9:05) максимальные значения мощности дозы излучения отмечены на высотах от 9 до 17 км, затем и в течение второго часа (с 9:35 до 10:30) на высотах с 12 до 17 км и с 3 ч (с 11:00) на более низких высотах от 9 до 12 км.

В последующие сроки мощности дозы излучения постепенно уменьшаются и сохраняются на повышенных уровнях до конца первых суток. Учитывая последующую вторую солнечную вспышку, небольшое повторное увеличение показателей отмечено через 9 ч наблюдений (в 19:40), но его продолжительность и величина (от 12 раз для широты Минеральных Вод до 50 раз для широты Мурманска) были значительно меньше, ввиду того, что при движении Земли вокруг Солнца линия оси солнечной вспышки смещалась в сторону от направления на Землю.

4. Расчеты доз облучения летного состава при авиационных полетах в меридиональных и широтных направлениях при высокой и низкой вспышечной активности Солнца

Дозы облучения летного состава рассчитаны за время выполнения авиаперелетов в период солнечной вспышки 8 июня 2024 г. (рис. 17 А) и в спокойном периоде 8 июля 2024 г. (рис. 17 Б) и представлены в табл. 1.

Выполненные расчеты (табл. 1) позволяют провести анализ факторов, влияющих на дозу облучения летного состава при авиаперелетах в условиях солнечной вспышки и при низкой солнечной активности:

- широта вылета и авиаперелета (чем выше широта, тем больше мощность дозы излучения);
- время вылета по отношению его близости к началу максимума излучения от солнечной вспышки, по мере переноса от момента начала пика вспышки доза существенно снижается в течение 2–3 ч;
- расстояние между пунктами вылета и прилета, пропорциональное общему времени авиаперелёта;
- высота полёта (на высоте 7,5 км доза меньше, чем на высоте 12 км в 2–2,5 раза).

Таким образом, в Северном полушарии при авиаперелетах в диапазоне восточной долготы от 33 до 93 ВД доза за полет определяется в основном факторами 1–4. Однако закономерности формирования суммарной дозы за авиаперелет в период солнечной вспышки достаточно сложные и не всегда однозначные, как позволил выявить анализ совокупности этих результатов.

Рейс Москва–Тюмень короче (расстояние 1713 км, полетное время 2ч 25 мин), чем рейс Новосибирск–Ташкент (расстояние 1830 км, полетное время 2 ч 40 мин), однако в период солнечной вспышки доза за рейс Москва–Тюмень (43,52 мкЗв) больше, чем доза за рейс Новосибирск–Ташкент (38,49 мкЗв), так как рейс Мо-



Рис. 14. Зависимости мощности дозы излучения от высоты от 1 до 20 км при солнечном протонном событии на 9 ч 8 июня 2024 г.: по оси ординат – высота над уровнем моря, км, по оси абсцисс – мощность эквивалентной дозы, мкЗв/ч
 Fig. 14. Dependences of the radiation dose rate on the altitude from 1 to 20 km during the solar proton event at 9 a.m. on June 8, 2024: on the ordinate axis – height above sea level, km, on the abscissa axis – the equivalent dose rate, µSv/hr

сква–Тюмень проходит севернее (от 56 до 57 ° СШ), чем рейс Новосибирск–Ташкент (от 55 до 41 ° СШ) и вылет начинается на 35 мин раньше, то есть ближе к моменту максимума солнечной вспышки. При низкой солнечной активности соотношение доз за эти рейсы меняется: доза за рейс Москва–Тюмень меньше (3,59 мкЗв), чем доза за рейс Новосибирск–Ташкент (5,16 мкЗв), так как более равномерна по времени полёта и поэтому в большей мере определяется высотой полёта и полётным временем.

Рейс Норильск-Красноярск по времени в 2 раза короче (расстояние 1500 км, полетное время 2 ч 20 мин), чем рейс Норильск-Ташкент (расстояние 2356 км, полетное время 4 ч 40 мин), при этом в период солнечной вспышки доза за рейс Норильск-Ташкент оказалась не намного больше (147,95 мкЗв), чем доза за рейс Норильск-Красноярск (139,93 мкЗв). Это связано с тем, что максимальная доза набирается за первые 2–3 ч полета после вспышки. У рейса Норильск-Красноярск время вылета (7:45) на 45 мин было раньше и ближе к максимуму мощности дозы на этой высоте полёта, чем у рейса Норильск-Ташкент (8:30). А через 3 ч после начала максимума пик радиации быстро спадает ввиду скоротечности процессов реализации энергии протонов на этих высотах и резкого уменьшения ионизации компонентов атмосферы. При низкой солнечной активности различия в дозах за эти рейсы, несмотря на двукратную разницу в их продолжительности, незначительны (Норильск– Красноярск 10,12 мкЗв, Норильск–Ташкент 13,58 мкЗв), так как при низкой солнечной активности мощность дозы на этих высотах за 1 ч полета с изменением широты полета, в отличие от условий при вспышке, меняется незначительно.

Обсуждение

МКРЗ остается приверженной беспороговой концепции негативного влияния малых доз, это положение справедливо и для всего диапазона доз ионизирующего излучения ниже 100 мЗв. В связи с этим остается весьма актуальными направлениями контроль за дозами облучения летного состава и организация мероприятий по снижению доз их облучения.

Сопоставление доз облучения летного состава, полученных в данном исследовании разными методами, позволяет заключить следующее. При оценках дозы излучения по маршрутам авиаперелетов Москва–Сим-



Рис. 15. Динамика мощности дозы излучения в период солнечной вспышки 8 июня 2024 г. в Северном полушарии на высотах 1, 7, 9, 12, 17 и 19 км от начала эффекта солнечной вспышки к её завершению на широте А – Мурманск, Б – Москва, В – Минеральные Воды. По оси ординат – мощность эквивалентной дозы, мкЗв/ч, по оси абсцисс – время суток, часы и минуты.

Fig. 15. The dynamics of the radiation dose rate during the solar flare on June 8, 2024 in the Northern Hemisphere at altitudes of 1, 7, 9, 12, 17 and 19 km from the beginning of the solar flare effect to its completion at latitude A – Murmansk, B – Moscow, C – Mineralnye Vody. On the ordinate axis is the equivalent dose rate, μ Sv/hr, on the abscissa axis is the time of day, hours and minutes.

ферополь и Москва-Минеральные воды дозиметррадиометр «ЭКОЛОГ супер» регистрировал только электромагнитное (фотонное или гамма) излучение с энергией отсечения 3 МэВ. Этот дозиметр не позволяет регистрировать дозу излучения непосредственно от протонов и нейтронов. В то же время с увеличением широты и высоты полета в суммарной дозе от СКЛ и ГКЛ доля нейтронного излучения по отношению к гамма-излучению возрастает. Как указывается в работе [1],



Рис. 16. Динамика мощности дозы излучения в период солнечной вспышки 8 июня 2024 г. в Северном полушарии на высотах 1, 7, 9, 12, 17 и 19 км от начала эффекта солнечной вспышки к её завершению на широте А – Москва, Б – Минеральные воды. По оси ординат – мощность эквивалентной дозы, мкЗв/ч, по оси абсцисс – время суток, часы и минуты

Fig. 16. The dynamics of the radiation dose rate during the solar flare on June 8, 2024 in the Northern Hemisphere at altitudes of 1, 7, 9, 12, 17 and 19 km from the beginning of the solar flare effect to its completion at latitude A – Moscow, B – Mineralnye Vody. On the ordinate axis is the equivalent dose rate, μ Sv/hr, on the abscissa axis is the time of day, hours and minutes

соотношение мощности поглощенной дозы гамма-излучения и мощности эквивалентной дозы нейтронов с энергиями до 17 МэВ на высоте 12 км на 38–56 °СШ составляло 1,44, на 60–82 °СШ составляло 1,67. По результатам измерений различными типами детекторов (TEPC, Silicon detector, GM counter, EPD, TLDs + etched track, Bubble detector) превышение интегрального эквивалента амбиентной дозы от нейтронов над дозой от электромагнитного излучения на высотах 10–16 км составило 1,41 [4]. По данным [23–25], вклад нейтронной компоненты в общую дозу для экипажей и пассажиров авиалайнеров на высотах 10–12 км может составлять от 30 до 80 % в зависимости от высоты и широт, на которых совершается полет.

В соответствии с этим суммарные дозы за данные два авиаперелета могут составить (табл. 2):

Москва–Симферополь 1,93 + 1,93 × 1,44 = 1,93 + 2,78 = 4,7 мкЗв

Москва–Минеральные Воды 4,95 + 4,95 × 1,44 = 4,95 + 7,13 = 12,08 мкЗв

Результаты измерений на борту самолета в полетах с использованием дозиметра-радиометра «ЭКОЛОГ супер» и выполненные расчеты суммарной дозы за время

Таблица 1

Параметры авиаперелетов и дозы облучения за авиаперелет в периоды низкой и высокой CA Parameters of air travel and radiation doses per flight during periods of low and high solar activity

Зона 1)	N₂	№ АП вылета и /п прилета	Коорд	рдинаты ²⁾ Расстоян		, Время	Время	Высота полета,	Доза за авиаперелет, мкЗв	
	п/п		СШ	ВД	км 3)	вылета 4)	полета 5,6)	тысячи м	Низкая СА 8.07.2024	Высокая СА 8.06.2024
1		Мурманск-	69	33	1487	07:35	2ч 20 мин	12	9,9	149,1
-	1.1	Москва	56	38						
	1.2	Норильск	70	88	1500	07:45	2ч 20 мин	12	10,1	139,9
	1.2	Красноярск	56	93	1500					
	1.3	Норильск	70	88	2256	8:30	4ч 40 мин	12	13,6	148,0
		Ташкент	41	69	2330					
	1.4	Мурманск	69	33	2964	9:00	4ч 30 мин	7,5	8,1	73,5
	1.4	Актау	44	51						
2	2.1.	Москва	56	38	1658+642 через Актау	8:35	3 ч 16 мин	12	4,0	43,4
		Минводы	44	43						
	2.2	Москва	56	38	1340 через Ростов	8:35	2ч 20 мин	12	2,38	39,6
	2.2	Минводы	44	43						
	2.3	Москва	56	38	1226	8:40	1 ч 55 мин	12	2,0	30,8
		Симферополь	45	34						
	24	Новосибирск	55	83	1920	08:50	2ч 40 мин	12	2,9	38,5
	2.4	Ташкент	41	69	1630					
3	3.1	Москва	56	38	1713	8-25	2ч 25 мин	12	5,2	43,5
		Тюмень	57	66						

Примечания:

¹⁾ зона полетов 1 – направление полета преимущественно с севера на юг по широте 70–56° СШ, 33–93° ВД; 2 – направление полета преимущественно с севера на юг по широте 56–41 ° СШ, 34–83 ° ВД; 3 – направление полета преимущественно по меридиану 69–83; 56–57 ° СШ;

²⁾ координаты в градусах СШ и ВД с учетом уровней точности графических методов оценок даны с округлением до целых значений;

³⁾ расстояние по кратчайшему пути (приводится для справки);

⁴⁾ время вылета из аэропорта отправления московское;

⁵⁾ время приводится для полета на высоте 12000 м (единообразная высота полета 12000 м выбрана для сопоставления дозы облучения за разные по направлениям полеты);

⁶⁾ авиарейсы выполнялись на самолетах BOEING-777, AIRBUS A-320, A-321



Рис. 17. Динамика солнечного рентгеновского излучения с датчиков спутника GOES-16 за 1 мин: А – в период солнечной вспышки 8 июня 2024 г., Б – в периоде минимальной солнечной вспышечной активностью 8 июля 2024 г. по данным Space Weather Prediction Center-National Oceanic and Atmospheric Administration

По левой оси ординат – рентгеновский поток, Вт/м², по правой оси ординат – класс солнечной вспышки, по оси абсцисс – универсальное время Fig. 17. The dynamics of solar X-ray radiation from the GOES-16 satellite sensors in 1 minute: A – during a solar flare on June 8, 2024, Б – during a period with minimal solar flare activity on July 8, 2024 according to the Space Weather Prediction Center - National Oceanic and Atmospheric Administration On the left ordinate axis is the X-ray flux, W/m², on the right ordinate axis is the solar flare class, on the abscissa axis is the universal time

полетов Москва–Симферополь и Москва-Минеральные Воды оказались в 2–3 раза выше, чем оценки сделанные по программному комплексу RUSCOSMICS. Авторы комплекса RUSCOSMICS в качестве исходных данных для разработанной ими модели использовали первичные спектры протонов со спутников GOES, результаты измерений наземных нейтронных мониторов и все известные виды взаимодействий частиц в расчете поглощен-

ной энергии в объеме вещества (эквивалентной дозы), которые затем с использованием коэффициентов пересчета преобразовывались в мощности дозы излучения на разных высотах и широтах. При этом расхождения данных, получаемых с использованием модели, с реальными измерениями составляли от 10 до 20 % [8–10]. Такой диапазон погрешностей моделей, как и отмеченные нами расхождения с практическими измерениями, могут

Таблица 2

Результаты оценки мощности дозы и суммарной дозы излучения на эшелоне на маршрутах авиаперелетов Москва–Симферополь и Москва–Минеральные воды

The results of the assessment of the dose rate and total radiation dose at the flight level on the routes of flights Moscow–Simferopol and Moscow–Mineralnye Vody

Маршрут	Показа-	Время полета, ч:мин	Методы оценки показателей			
авиапере- лета	тель*		Дозиметр- «ЭКОЛОІ	Параметры модели		
			гамма- излуче- ние	гамма +нейтро- ны	RUSCOS- MICS 8.07.2024 г. ***	
Москва –	Р кр.эш, мкЗв/ч	1:55	1,18–1,38	2,88–3,36	0,63–1,16	
поль	Д сумм, мкЗв		1,93	4,7	2,0	
Москва– Минераль-	Р кр.эш, мкЗв/ч	3:16	1,31–1,82	3,20-4,44	0,56–1,16	
ные Воды (через Актау)	Д сумм, мкЗв		4,95	12,08	4,0	

Примечания:

- * Р кр.эш, мкЗв/ч диапазон мощности эквивалентной дозы излучения на крейсерском эшелоне полета (11 км); Д сумм, мкЗв – суммарная доза за авиаперелет;
- **Оценка проведена в периоды: Москва-Симферополь 25.09.2021 г., Москва- Минеральные Воды (через Актау) – 18.05.2022 г.;
- *** Оценка проведена в период минимальной солнечной вспышечной активности 8.07.2024 г.

быть связаны с большим количеством факторов, в том числе с уровнем солнечной вспышечной активности в конкретную дату полетов, высотой полетов, постоянно изменяющимся составом космических частиц, их энергетическим спектром (флюенсом нейтронов и др.) и анизотропией среды, которые важно учитывать, но крайне затруднительно добиться их полного соответствия при таких сравнениях. В других подобного рода исследованиях экспериментальные данные измерений дозы от ГКЛ в авиационном полёте согласуются с расчетными значениями в пределах 25–30 % [2, 7]. Измерения и усовершенствования моделирования радиационного воздействия, вызванного солнечными частицами при событиях SEP, по-прежнему являются важным направлением будущих исследовательских проектов.

Тем не менее, использование инфографики с сайта программы RUSCOSMICS, на котором все данные отображаются практически в режиме реального времени (обновляются каждые 5 минут), позволяет получать оперативные оценки доз облучения летного состава на высотах от 1 до 20 км. Это особенно важно в моменты редких, но сильных кратковременных солнечных вспышек с мощными протонными выбросами в сторону земли, при которых летный состав может получать дозы облучения во много раз большие, чем при полете в условиях низкой солнечной вспышечной активности.

По результатам дозиметрических исследований, проведенных в разных странах, в том числе в России, мощность дозы для средних широт с жесткостью фильтрации 2–3 ГэВ (сюда входит зона Москвы) составляет на высотах 10–12 км 4–8 мкЗв/ч, на высотах 16–18 км 10–20 мкЗв/ч – при спокойной радиационной обстановке, то есть при отсутствии солнечных вспышек [1, 23, 26, 27]. Очевидно, что дополнительные дозовые нагрузки от проникающего космического излучения галактического происхождения и в моменты солнечных протонных событий обуславливают радиационный риск как профессиональный фактор труда экипажей гражданской авиации [28–35] дополнительно к фактору напряженности труда летного состава [36, 37].

Наши оценки максимальной мощности суммарного излучения на крейсерской высоте авиационного полета при низкой солнечной активности составляли для рейса Москва-Симферополь 2,88-3,36 мкЗв/ч, для рейса Москва-Минеральные воды 3,2-4,44 мкЗв/ч. Эти значения близки к измерениям при выполнении рейса Санкт-Петербург (Пулково)–Минеральные Воды [31], которые проводили индикатором «Radiascan 701А» с регистрацией мощности ионизирующего излучения (альфа-, бета-, гамма-) и с фиксацией накопленной дозы при погрешности измерения 5-8 %. Колебания мощности дозы на крейсерском эшелоне составляли 257-341 мкР/ч (2,25–2,99 мкЗв/ч) [31]. Поэтому полагаем, что значения такого порядка можно принимать за минимальные уровни при расчетах годовой дозы облучения для летных экипажей.

В то же время прогностические оценки показывают, что при развитии мощных солнечных вспышек (протонных событий) мощность дозы в полярных областях при жесткости фильтрации 0,1-0,5 ГэВ на высотах около 12 км может кратковременно превышать 500 мкЗв/ч [1, 38-42]. Сразу после мощной солнечной вспышки, направленной на Землю, повышенный радиационный фон в верхних слоях атмосферы может приводить к увеличению до 10-15 раз доз облучения летного состава, выполняющего плановые рейсы в северных широтах и над полярными регионами в это время [31, 43]. Так, по расчетам [42] пиковая мощность дозы облучения при смоделированном максимальном за период космогенных наблюдений протонного события 774 года н.э. с частицами, соответствующими по энергетическому спектру событию GLE № 5, на высоте 12,2 км над уровнем моря составила ≈ 750 мЗв/ч. За первые 4 ч такого события за время полёта в рамках типичного межконтинентального перелёта над полюсами, где магнитосферное экранирование минимально, на высоте ≈12 200 м над уровнем моря накопленная доза облучения с учетом спада мощности дозы от начала солнечной вспышки составила бы ≈1,38 Зв, что приведёт к развитию острого лучевого синдрома.

Важность данного обстоятельства обусловлена тем, что количество солнечных вспышек за 11-летний цикл солнечной активности (CA) составляет величину порядка нескольких десятков тысяч. Так, в прошедшем 24-ом цикле СА за период с 2009 по 2020 гг., произошло более 40 тыс. солнечных вспышек и более 500 мощных магнитных бурь [40, 41]. В минимуме СА солнечных протонных событий практически не бывает, а в максимуме СА солнечные вспышки могут происходить с интервалом менее двух часов. Большинство из них слабые солнечные вспышки, которые сопровождаются потоками частиц СКЛ с энергиями менее 1 МэВ. В максимуме СА доля средних, мощных и сверхмощных солнечных вспышках значительно возрастает, при этом увеличиваются энергические уровни этих потоков СКЛ. По прогнозам [40], в максимуме СА могут наблюдаться:

- одна в неделю средняя вспышка с потоками частиц СКЛ, максимальная энергия которых для ядер химических элементов может достигать 10 МэВ/нуклон и для электронов – 1 МэВ;
- один раз в месяц средняя вспышка, максимальная энергия частиц СКЛ в которых может достигать 100 МэВ/нуклон для ядер и около нескольких МэВ для электронов;
- один раз в год максимальная вспышка, энергия частиц СКЛ в которой может достигать 1 ГэВ/нуклон для ядер и несколько десятков МэВ для электронов;

 до трёх сверхмощных солнечных вспышек за весь 11-летний цикл СА (подобных сверхмощной вспышке 16.07.1959 г.), в которых максимальная энергия частиц СКЛ может достигать 10 ГэВ/нуклон для ядер и 100 МэВ для электронов.

Такой вероятностный характер солнечных вспышек свидетельствует о важности постоянного мониторирования радиационной обстановки на высотах полетов гражданской авиации для учета её внезапных изменений [6, 9, 10, 27, 43]. Однако точное прогнозирование и предсказание солнечных вспышек до настоящего времени для современной науки остаётся нерешенной проблемой. Сведения о них ученые могут получать только по данным о возрастании уровней космического излучения с датчиков спутников, обращающихся вокруг Земли на высоких орбитах (около 500 км от Земли). Учитывая скорость распространения протонов от солнечной вспышки, близкую к скорости света, они достигают Земли уже через 3-4 ч. Поэтому защитить человека от повышенных уровней излучения в моменты этих событий – достаточно сложная задача. Для космонавтов она решается передачей информации из центра управления полетами о недопустимости внекорабельной деятельности в открытом космосе и необходимости перейти на этот период в противорадиационные убежища на борту орбитального космического комплекса.

В авиации рекомендации на время солнечной вспышки отменить плановые авиарейсы, изменить эшелон полета, практически невыполнимы, так как приведут к сбоям в работе всех аэропортов. Несмотря на существование данной проблемы, количество трансполярных перелетов в последние десятилетия стремительно возрастает. Связано это с существенной экономией топлива, выигрышем во времени и с международными событиями.

Самолеты гражданской авиации специальной защиты от ионизирующего излучения не имеют, а потому дозу ионизирующей радиации для экипажа можно уменьшить лишь изменением маршрута и эшелонов полета, уменьшением санитарной нормы летных часов [31]. Но каждое из этих изменений встречает серьезные экономические возражения, связанные со снижением путевой скорости самолетов, увеличением расхода топлива, сложностей в изменении расписания и маршрутов полёта и т.д. В связи с этим для летного состава необходимо разрабатывать свой комплекс мероприятий по снижению рисков от радиационного воздействия.

Об актуальности проблемы обеспечения радиационной безопасности летного персонала и пассажиров самолетов свидетельствует постоянное внимание к ней Научного комитета ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН), а также Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Международная организация гражданской авиации (ИКАО) разработала перечень мероприятий по обеспечению радиационной безопасности экипажей и пассажиров самолетов, важнейшими из которых является контроль уровня излучения на трассе полета и прогноз радиационной обстановки в зонах авиационных перевозок [6, 28, 44].

Существуют программы и калькуляторы для расчета доз облучения летного состава, которые используются членами экипажей самолетов для подсчета дозы облучения за время авиаперелета. Примером такого калькулятора является компьютерная программа CARI-7A и CARI-7 [45, 46], разработанные в Civil Aeromedical Research Institute (ныне – Гражданский аэрокосмический медицинский институт Федерального авиационного управления (Federal Aviation Administration – FAA's Civil Aerospace Medical Institute). Эта программа позволяет рассчитать эффективную дозу галактического космического излучения, полученную человеком (на основе антропоморфного фантома) при полете на самолете по кратчайшему расстоянию между двумя аэропортами мира. Программа учитывает изменения высоты и географического положения в ходе полета на основе профиля полета, введенного пользователем. Результаты сравниваются с результатами измерений на борту коммерческих пассажирских самолетов, высотных исследовательских самолетов и аналогичными расчетами других компаний [45].

Разработан Европейский программный пакет EPCARD (European Program-Package for the Calculation of Aviation Route Doses) [47, 48] для расчета доз на авиационном маршруте – автономное приложение для персонального компьютера, которое рассчитывает дозы космического излучения, полученные отдельными лицами на любом авиационном маршруте на высотах полета от 5000 м до 25 тыс. м как по критериям эквивалентой дозы для окружающей среды, так и эффективной дозы облучения человека.

Однако эти программы коммерческие или недоступные для отечественных пользователей. В 2022 г. был разработан и функционировал на сайте ИКИ РАН программный пакет и калькулятор для оценки дозы облучения за авиационный полет. Исходными данными для него служили пункт вылета, пункт прилета, дата вылета, высота полета, скорость полета, уровень солнечной активности. При расчетах по этому калькулятору были получены суммарные дозы от всех видов излучения. Их значения составили для года минимальной активности Солнца / года максимальной активности Солнца для авиарейса Москва – Симферополь 12,75 / 9,51 мкЗв, для авиарейса Москва – Минеральные воды 27,66 / 20,64 мкЗв, то есть в 4,5-6,5 большие, чем по нашим измерениям и расчетам. Это может быть связано с тем, что дозиметр-радиометр «ЭКОЛОГ супер» не оценивает дозу от нейтронного компонента, а особенностью радиационного воздействия на организм человека в высоких слоях атмосферы является значительный вклад в эквивалентную дозу вторичных нейтронов, имеющих высокий коэффициент качества (до 8–12). За счет этого средний коэффициент качества ионизирующего излучения естественного происхождения в атмосфере на высотах 10-16 км составляет 1,5-2,2 [1, 49]. Это важно учитывать при переходе от поглощенной дозы излучения (оцениваемой в греях) к эквивалентной дозе (оцениваемой в зивертах). Однако программные комплексы пока не позволяют полностью учитывать постоянно изменяющиеся характеристики состава и энергетического спектра космических излучений. Таким образом, проблема создания прикладных доступных программ для оперативной оценки доз облучения летного состава на маршрутах авиаперелетов в зависимости широты и высоты полета, а также в разные периоды солнечной активности для нашей страны остается актуальной.

Заключение

Выполненное исследование позволило проанализировать по данным модели RUSCOSMICS уровни радиации и их динамику на высотах от 1 до 20 км и на разных широтах при спокойной солнечной активности, а также при солнечной вспышке среднего класса. Результаты подтверждают важность постоянного мониторирования радиационной обстановки на высотах полетов гражданской авиации для учета её внезапных изменений. Проведено сопоставление оценок дозы излучений в авиационных полётах по данным модели RUSCOSMICS с данными измерений дозиметра-радиометра. Результаты свидетельствуют о необходимости продолжать совершенствование данной модели и сопоставление получаемых по ней оценок мощности эквивалентной дозы на разных высотах и широтах с результатами практических измерений. Несомненно, что требуются дополнительные исследования по регистрации мощности эквивалентной дозы при авиационных полетах на разных высотах и широтах с использованием современной научно-исследовательской аппаратуры, позволяющей измерять дозу от всего спектра как электромагнитных, так и корпускулярных излучений.

Программный комплекс RUSCOSMICS является оперативным инструментарием оценки мощности дозы радиации при прохождении космических лучей (ГКЛ и СКЛ) через атмосферу Земли за период всего цикла солнечной активности, в том числе в моменты солнечных вспышек (протонных событий), это имеет важное практическое значение при оценке радиационной безопасности полетов воздушных судов гражданской авиации.

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
- 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
- European Commission. 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. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2004. 271 p.
 Морозова М.А., Лапиин В.Б., Доренский С.В., Сыроешкин
- Морозова М.А., Лапшин В.Б., Доренский С.В., Сыроешкин 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: Civil Aerospace Medical Institute FAA. 2021. 57 p. URL: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/ data_research/research/med_humanfacs/aeromedical/202108.pdf
- Beck P. Overview of Research on Aircraft Crew Dosimetry during the Last Solar Cycle // Radiation Protection Dosimetry. 2009. V.136. No.4. P. 244-250. doi: 10.1093/rpd/ncp158
- Маурчев Е.А., Балабин Ю.В. Модельный комплекс для исследования космических лучей RUSCOSMIC // Солнечноземная физика. 2016. Т.2. №4. С.3-8. doi: 10.12737/21289
- Маурчев Е.А., Михалко Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. Оценка эквивалентной дозы излучения на разных высотах атмосферы Земли // Солнечно-земная физика. 2022. Т.8. №3. С.29-34. doi: 10.12737/szf-83202204
- 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. T.2. №2. С.13-18. doi: 10.37614/2949-1185.2023.2.2.002
- Калмыков Н.Н., Куликов Г.В., Роганова Т.М. Галактические космические лучи // Модель космоса. Т. 1 / Под ред. проф. М.И.Панасюка. М.: Книжный дом Университет, 2007. С.62-95.
- Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А., Семёнов В.Т. Оценка оптимальных параметров экранов для защиты электронных систем космических аппаратов от ионизирующих излучений // Вопросы электромеханики. 2012. Т.131. №6. С.15-18.
- Безродных И.П. Факторы космического пространства, влияющие на исследование и освоение Луны. М.: ИКИ РАН, 2014. 39 с. Электронный pecypc: https://disk.yandex.ru/i/s1X7uZZTHMqeAQ
- Новиков Л.С. Космическое материаловедение. М.: Макс Пресс, 2014. 448 с.
- 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. V.15. No.2. P.151. doi: 10.3390/atmos15020151
 Белов А.В., Курт В.Г. Солнечные космические лучи. Модель кос-
- Белов А.В., Курт В.Г. Солнечные космические лучи. Модель космоса. Т.1 / Под ред. проф. М.И.Панасюка. М.: Книжный дом Университет, 2007. С.293-313.
- 17. *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

- Kirillov A.S., Belakhovsky V.B., Maurchev E.A., Balabin Y.V., Germanenko A.V., Gvozdevsky B.B. Vibrational Kinetics of NO and N2 in the Earth's Middle Atmosphere during GLE69 on 20 January 2005 // J. Geophys. Res. Atmos. 2003. V.128. P. e2023JD038600.
- Jackman C.H., Deland M.T., Labow G.J., Fleming E.L., Weisenstein D.K., Ko M.K.W., Sinnhuber M., Anderson J., Russell J.M. The Influence of the Several Very Large Solar Proton Events in Years 2000–2003 on the Neutral Middle Atmosphere // Advances in Space Research. 2005. V.35. No.3. P.445–450. doi: 10.1016/j.asr.2004.09.006
- Funke B., Baumgaertner A., Calisto M., Egorova T., Jackman C.H., Kieser J., Krivolutsky A., López-Puertas M., Marsh D.R., Reddmann T., et al. Composition Changes after the «Halloween» Solar Proton Event: The High Energy Particle Precipitation in the Atmosphere (HEPPA) Model Versus MIPAS Data intercomparison Study // Atmospheric Chemistry and Physics. 2011. V.11. No.17. P.9089-9139. doi: 10.5194/acpd-11-9407-2011
- Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B. Features of Relativistic Solar Proton Spectra Derived from Ground Level Enhancement Events (GLE) Modeling // Astrophysics and Space Sciences Transactions. 2011. V.7. No.4. P.459-463. doi: 10.5194/astra-7-459-2011
- Bütikofer R., Flückiger E.O., Desorgher L., Moser M.R. The Extreme Solar Cosmic Ray Particle Event on 20 January 2005 and its Influence on the Radiation Dose Rate at Aircraft Altitude // The Science of the Total Environment. 2008. V.391. No.2-3. P. 177-183. doi: 10.1016/j. scitotenv.2007.10.021.
- Poje M., Vuković B., Radolić V., Miklavčić I., Planinić J. Neutron Radiation Measurements on Several International Flights // Health Physics. 2015. V.108. No.3. P.344-350. doi: 10.1097/HP.000000000000192
- 24. Доренский С.В., Минлигареев. В.Т., Сыроешкин А.В. Определение суммарной мощности эквивалентной дозы, полученной пассажирами и членами экипажей при авиаперелетах // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015: Аннотации докладов Т.1., Москва, 16– 20 февраля 2015 г. М.: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2015. С.176.
- 25. Рябева Е.В., Идалов В.А., Минлигареев В.Т., Кравченок В.Л. Контроль дозы и спектра нейтронов на высотах авиаперелетов // Гелиогеофизические исследования. 2020. №25. С.37-44.
- Montagne C., Donne J.P., Pelcot D., Nguyen V.D., Bouisset P., Kerlau G. In Flight Radiation Measurements on Board FRENCH Airliners // Radiation Protection Dosimetry. 1993. V.48. No.1. P. 79-83. doi: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a081847
- Reitz G. Radiation Environmertt in the Stratosphere // Radiation Protection Dosimetry. 1993. V.48. No.1. P. 5-20. doi: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a081837
- Ерхов В.И. Контроль уровней ионизирующего излучения в нижних слоях атмосферы: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: Институт прикладной геофизики. 1994. 17 с.
- 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.
- 30. 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. Р.А.Вартбаронова. М.: АПР, 2011. 528 с.
- Левчук И.П., Борщев А.Н., Афанасьев Р.В., Деллалов Н.Н., Афанасьев С.В., Рылин Ю.В. Радиационный риск как профессиональный фактор труда экипажей гражданской авиации // Тверской медицинский журнал. 2020. №.6. С.14-19.
- 32. Ушаков И.Б., Федоров В.П. Радиационные риски вертолетчиков при ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС: ранние и отдаленные нарушения здоровья // Медицина катастроф. 2021. №3. С.52-57. doi: 10.33266/2070-1004-2021-3-52-57.

67

- Пронин М.А., Солдатов С.К. Малые дозы радиации и здоровье лётчиков / Под ред. акад. РАН И.Б.Ушакова. М.: Физматлит, 2023. 232 с.
- 34. DeAngelis G., Wilson J.W. Chapter 18: Radiation-Related Risk Analysis for Atmospheric Flight Civil Aviation Flight Personnel // Wilson J.W., Jones I.W., Maiden D. L., Goldhagen P. Atmospheric Ionizing Radiation (AIR): Analysis, Results, and Lessons Learned From the June 1997 ER-2 Campaign. NASA/CP-2003-212155. March 2003. P.352-367. URL: https://www.researchgate.net/publication/24289925_Radiation-Related_Risk_Analysis_for_Atmospheric_Flight_Civil_Aviation_Flight_Personnel/references
- 35. Ушаков И.Б., Федоров В.П., Померанцев Н.А. Радиация. Авиация. Человек (Очерки практической радиобиологии человека). М.: ФМБЦ им. А.И.Бурназяна ФМБА России, 2024. 388 с.
- 36. Бухтияров И.В., Зибарев Е.В., Курьеров Н.Н., Иммель О.В. Санитарно-гигиеническая оценка условий труда пилотов гражданской авиации // Гигиена и санитария. 2021. Т.100. №10. С.1084-1094. doi: 10.47470/0016-9900-2021-100-10-1084-1094
- 37. Бухтияров И.В., Зибарев Е.В., Кравченко О.К. Проблемы гигиенического нормирования условий труда в гражданской авиации и пути их решения (обзор литературы) // Гигиена и санитария. 2022. Т.101. №10. С.1181-1189. doi: 10.47470/0016-9900-2022-101-10-1181-1189.
- Armstrong T.W., Alsmiller R.G., Barish J. Calculation of the Radiation Hazard at Supersonic Aircraft Altitudes Produced by an Energetic Solar Flare // Nucl. Sci. and Eng. 1969. V.37. No.3. P.337-342. doi: 10.13182/NSE69-A19110
- Источники, эффекты и опасность ионизирующей радиации: Доклад научного комитета ООН по действию атомной радиации Т.1. М.: Мир, 1992. 552 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199 000009 001655454/
- 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.
- Безродных И.П., Тютнев А.П., Семенов В.Т. Радиационные эффекты в космосе. Часть 1. Радиация в околоземном космическом пространстве. М.: Корпорация ВНИИЭМ, 2014. 105 с.

- Mishev A., Panovska S., Usoskin I. Assessment of the Radiation Risk at Flight Altitudes for an Extreme Solar Particle Storm of 774 AD // J. Space Weather Space Clim. 2023. V.13. P. 22. doi: 10.1051/ swsc/2023020
- 43. Буров В.А. Авиаперевозки и космическая погода // Гелиогеофизические исследования. 2013. №5. С.43–52.
- 44. Friedberg W., Copeland K. Ionizing Radiation in Earth's Atmosphere and in Space Near Earth. Report No. DOT/FAA/AM-11/9. FAA Civil Aerospace Medical Institute. Oklahoma City: Federal Aviation Administration, 2011. 28 p.
- Copeland K. CARI-7A: Development and Validation // Radiation Protection Dosimetry. FAA (FAA's Civil Aerospace Medical Institute). 2017. P.1-13. doi: 10.1093/rpd/ncw369. URL: https://www.faa.gov/ data_research/research/med_humanfacs/aeromedical/radiobiology/ cari7
- 46. Copeland K. CARI-7 Documentation: Particle Spectra. Report № DOT/FAA/AM-21/4. Civil Aerospace Medical Institute FAA. March 2021. Office of Aerospace Medicine Federal Aviation Administration 800 Independence Ave., S.W. Washington, DC 20591. 21 p. / Copeland K. CARI-7 Documentation: Radiation Transport in the Atmosphere. Report № DOT/FAA/AM-21/5 March 2021. Civil Aerospace Medical Institute FAA. Washington DC, Office of Aerospace Medical Aviation Administration 800 Independence Ave., 20591. 30 p. URL: http://www.faa.gov/go/oamtechreports/
- Mares V., Maczka T., Leuthold G., Rühm W. Air Crew Dosimetry with a New Version of EPCARD // Radiat Prot Dosimetry. 2009. V.136. No4. P.262-266. doi: 10.1093/rpd/ncp129. https://pubmed.ncbi.nlm.nih. gov/19608574/
- Sovilj M.P., Vuković B., Radolić V., Miklavčić I., Stanić D. Potential Benefit of Retrospective Use of Neutron Monitors in Improving Ionising Radiation Exposure Assessment on International Flights: Issues Raised by Neutron Passive Dosimeter Measurements and EPCARD Simulations during Sudden Changes in Solar Activity // Arh Hig Rada Toksikol. 2020. V.71. No.2. P.152-157. doi: 10.2478/aiht-2020-71-3403
- Kiefer J. On the Biological Significance of Radiation Exposure in Air Transport // Radiation Protection Dosimetry. 1993. V.48. No.1. P.107-110. doi: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a081851

REFERENCES

- Ushakov I.B., Zuyev V.G., Abramov M.M., Soldatov S.K., Galkin A.A., Chernov Yu.N., Popov V.I. *Radiatsionnyy Risk v Aviatsionnykh Poletakh* = Radiation Risk in Aviation Flights. Moscow-Voronezh, Istoki Publ., 2001. 44 p. (In Russ.).
- 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
- 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
- 4. Radiation Protection 140. Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew. Compilation of Measured and Calculated Data. Final Report of EU-RADOS 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.
- Morozova M.A., Lapshin V.B., Dorenskiy S.V., Syroyeshkin A.V. Dosimetry for Passenger Air Service. *Geliogeofizicheskiye Issledovaniya* = Heliogeophysical Research. 2014;10:45-92 (In Russ.).
- 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, Civil Aerospace Medical Institute FAA. 2021. 57 p. URL: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/ data research/research/med humanfacs/aeromedical/202108.pdf
- 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
- Maurchev E.A., Balabin Yu.V. Model Complex for Studying Cosmic Rays RUSCOSMIC. Solnechno-Zemnaya Fizika = Solar-Terrestrial Physics. 2016;2;4:3-8 (In Russ.). doi: 10.12737/21289.
- Maurchev Ye.A., Mikhalko Ye.A., Balabin Yu.V., Germanenko A.V., Gvozdevskiy B.B. Estimated Equivalent Radiation Dose at Different Altitudes in Earth's Atmosphere. *Solnechno-Zemnaya Fizika* = Solar-Terrestrial Physics. 2022;8;3:27-31 (In Russ.). doi: 10.12737/ stp-83202204
- 10. 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. Seriya: Yestestvennyye i Gumanitarnyye Nauki* = Proceedings of the Kola Sci-

ence Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Natural Sciences and Humanities. 2023;2;2:13-18 (In Russ.). doi: 10.37614/2949-1185.2023.2.2.002

- Kalmykov N.N., Kulikov G.V., Roganova T.M. Galactic Cosmic Rays. Model' Kosmosa = Model of Space. Vol. 1. Ed. M.I. Panasyuk. Moscow, Knizhnyy Dom Universitet Publ., 2007. P. 62-95 (In Russ.).
- Bezrodnykh I.P., Morozova Ye.I., Petrukovich A.A., Semonov V.T. Evaluation of Optimal Parameters of Screens for Protection of Electronic Systems of Spacecraft from Ionizing Radiation. *Voprosy Elektromekhaniki* = Questions of Electromechanics. 2012;131;6:15-18 (In Russ.).
- Bezrodnykh I.P. Faktory Kosmicheskogo Prostranstva, Vliyayushchiye na Issledovaniye i Osvoyeniye Luny = Space Factors Influencing the Exploration and Development of the Moon. Moscow, IKI RAN Publ., 2014. 39 p. URL: https://disk.yandex.ru/i/s1X7uZZTHMqeAQ (In Russ.).
- Novikov L.S. Kosmicheskoye Materialovedeniye = Space Materials Science. Moscow, Maks Press Publ., 2014. 448p. (In Russ.).
- 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.
- Belov A.V., Kurt V.G. Solar Cosmic Rays. *Model 'Kosmosa* = Model of Space. Vol. 1. Ed. M.I. Panasyuk. Moscow, Knizhnyy Dom Universitet Publ., 2007. P. 293-313 (In Russ.).
- 17. Maurchev Ye.A. Software Package RUSCOSMICS in Problems of Cosmic Rays Passage through the Earth's Atmosphere. *Trudy Kol'skogo Nauchnogo Tsentra RAN* = Transactions of the Kola Science Centre of RAS. 2017;8;7-3:10-16 (In Russ.). EDN ZXPTKR
- RAS. 2017;8;7-3:10-16 (In Russ.). EDN ZXPTKR
 18 Kirillov A.S., Belakhovsky V.B., Maurchev E.A., Balabin Y.V., Germanenko A.V., Gvozdevsky B.B. Vibrational Kinetics of NO and N2 in the Earth's Middle Atmosphere during GLE69 on 20 January 2005. J. Geophys. Res. Atmos. 2003;128:e2023JD038600.
- Jackman C.H., Deland M.T., Labow G.J., Fleming E.L., Weisenstein D.K., Ko M.K.W., Sinnhuber M., Anderson J., Russell J.M. The Influence of the Several very Large Solar Proton Events in Years 2000– 2003 on the Neutral Middle Atmosphere. Advances in Space Research. 2005;35;3:445-450. doi: 10.1016/j.asr.2004.09.006
- 20. Funke B., Baumgaertner A., Calisto M., Egorova T., Jackman C., Kieser J., Krivolutsky A., López-Puertas M., Marsh D., Reddmann T., Rozanov E., Päivärinta S-M., Sinnhuber M., Stiller G., Verronen P., Versick S., Von T., Vyushkova T., Wieters N., Wissing Jan. Composition Chang-

es after the «Halloween» Solar Proton Event: the High Energy Particle Precipitation in the Atmosphere (HEPPA) Model Versus MIPAS Data Intercomparison Study. Atmos. Chem. Phys. 2011;11;17:9089-9139. doi: 10.5194/acpd-11-9407-2011

- Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B. Features of Relativistic Solar Proton Spectra Derived from Ground Level Enhancement Events (GLE) Modeling. Astrophys. Space Sci. Trans. 2011;7;4:459– 463. doi: 10.5194/astra-7-459-2011
- 22. Bütikofer R., Flückiger E.O., Desorgher L., Moser M.R. The Extreme Solar Cosmic Ray Particle Event on 20 January 2005 and its Influence on the Radiation Dose Rate at Aircraft Altitude. Sci Total Environ. 2008;391;2-3:177-83. doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.10.021
- Poje M, Vuković B, Radolić V, Miklavčić I, Planinić J. Neutron Radiation Measurements on Several International Flights. Health Phys. 2015;108;3:344-50. doi: 10.1097/HP.000000000000192
- 24. Dorenskiy S.V., Minligareyev. V.T., Syroyeshkin A.V. Determination of the Total Equivalent Dose Rate Received by Passengers and Crew Members during Air Travel. Scientific Session of NRNU MEPhI-2015. Abstracts of Reports. Vol.1. Moscow, February 16-20, 2015. Moscow, Natsional'nyy Issledovatel'skiy Yadernyy Universitet «MIFI» Publ., 2015. P. 176 (In Russ.).
- 25. Ryabeva Ye.V., Idalov V.A., Minligareyev V.T., Kravchenok V.L. Monitoring the Dose and Spectrum of Neutrons at Air Travel Altitudes. *Geliogeofizicheskiye Issledovaniya* = Heliogeophysical Research. 2020;25:37–44 (In Russ.).
- Montagne C., Donne J.P., Pelcot D., Nguyen V.D., Bouisset P., Kerlau G. In Flight Radiation Measurements on Board French Airliners. Radiation Protection Dosimetry, 1993;48;1:79-83. doi: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a081847
- Reitz G. Radiation Environment in the Stratosphere. Radiation Protection Dosimetry. 1993;48;1;5-20. doi: 10.1093/oxfordjournals.rpd. a081837
- Yerkhov V.I. Kontrol' Urovney Ioniziruyushchego Izlucheniya v Nizhnikh Sloyakh Atmosfery = Monitoring Levels of Ionizing Radiation in the Lower Layers of the Atmosphere. Abstract Candidate Thesis (Phys). Moscow, Institut Prikladnoy Geofiziki Publ., 1994. 17 p. (In Russ.). URL: https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01000042736?page=1&rotate= 0&theme=white
- 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.).
- 30. Kliniko-Funktsional'naya Diagnostika, Profilaktika i Reabilitatsiya Professional'no Obuslovlennykh Narusheniy i Subklinicheskikh Form Zabolevaniy u Letnogo Sostava = Clinical and Functional Diagnostics, Prevention and Rehabilitation of Professionally Conditioned Disorders and Subclinical Forms of Diseases in Flight Personnel Practical Guide to Aviation Clinical Medicine. Ed. R.A.Vartbaronov. Moscow, APR Publ., 2011. 528 p. (In Russ.).
- Levchuk I.P., Borshchev A.N., Afanas'yev R.V., Dellalov N.N., Afanas'yev S.V., Rylin Yu.V. Radiation Risk as a Professional Factor in the Work of Civil Aviation Crews. *Tverskoy Meditsinskiy Zhurnal* = Tver Medical Journal. 2020;6:14-19 (In Russ.).
- 32. Ushakov I.B., Fedorov V.P. Radiation Risks of Helicopter Pilots during the Liquidation of the Consequences of the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant: Early and Late Health Disorders. *Meditsina Katastrof* = Disaster Medicine. 2021;3:52-57 (In Russ.). doi: 10.33266/2070-1004-2021-3-52-57.
- Pronin M.A., Soldatov S.K. Malyye Dozy Radiatsii i Zdorov'ye Lotchikov = Low Doses of Radiation and the Health of Pilots. Ed. I.B.Ushakov. Moscow, Fizmatlit Publ., 2023. 232 p. (In Russ.).
- 34. DeAngelis G., Wilson J.W. Chapter 18: Radiation-Related Risk Analysis for Atmospheric Flight Civil Aviation Flight Personnel. In: Wilson J.W., Jones I.W., Maiden D.L., Goldhagen P. Atmospheric Ionizing Radiation (AIR): Analysis, Results, and Lessons Learned From the June 1997 ER-2 Campaign. NASA/CP-2003-212155. March 2003. P.352-367. URL: https://www.researchgate.net/publication/24289925 Radi

ation-Related_Risk_Analysis_for_Atmospheric_Flight_Civil_Aviation_Flight_Personnel/references

- Ushakov I.B., Fedorov V.P., Pomerantsev N.A. Radiatsiya. Aviatsiya. Chelovek (Ocherki Prakticheskoy Radiobiologii Cheloveka) = Radiation. Aviation. Man (Essays on Practical Human Radiobiology). Moscow, FMBTS im. A.I.Burnazyana FMBA Rossii Publ., 2024. 388 p. (In Russ.).
- Bukhtiyarov I.V., Zibarev Ye.V., Kur'yerov N.N., Immel' O.V. Sanitary and Hygienic Assessment of Working Conditions of Civil Aviation Pilots. *Gigiyena i Sanitariya* = Hygiene and Sanitation. 2021;100;10:1084-1094 (In Russ.). doi: 10.47470/0016-9900-2021-100-10-1084-1094
- 37. Bukhtiyarov I.V., Zibarev Ye.V., Kravchenko O.K. Problems of Hygienic Standardization of Working Conditions in Civil Aviation and Ways to Solve Them (Literature Review). *Gigiyena i Sanitariya* = Hygiene and Sanitation. 2022;101;10:1181-1189 (In Russ.). doi: 10.47470/0016-9900-2022-101-10-1181-1189
- Armstrong T.W., Alsmiller R.G., & Barish J. Calculation of the Radiation Hazard at Supersonic Aircraft Altitudes Produced by an Energetic Solar Flare. Nuclear Science and Engineering. 1969;37;3:337–342. doi: 10.13182/NSE69-A19110
- 39. Istochniki, Effekty i Opasnost' Ioniziruyushchey Radiatsii = Sources, Effects and Danger of Ionizing Radiation. Report of the UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Vol.1. Moscow, Mir Publ., 1992. 552 p. (In Russ.). URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001655454/
- 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* = Questions of Electromechanics. Proceedings of VNIIEM. 2010;116;3:23-26 (In Russ.).
- Bezrodnykh I.P., Tyutnev A.P., Semenov V.T. Radiatsionnyye Effekty v Kosmose = Radiation Effects in Space. Part1. Radiation in Near–Earth space. Moscow, Korporatsiya VNIIEM Publ., 2014. 105 p. (In Russ.).
- Mishev A., Panovska S., Usoskin I. Assessment of the Radiation Risk at Flight Altitudes for an Extreme Solar Particle Storm of 774 AD. J. Space Weather Space Clim. 2023;13:22. doi: 10.1051/swsc/2023020.
- Burov V.A. Air Transportation and Space Weather. *Geliogeofiziches-kiye Issledovaniya* = Heliogeophysical Research. 2013;5:43–52 (In Russ.).
- Friedberg W., Copeland K. Ionizing Radiation in Earth's Atmosphere and in Space Near Earth. Report No. DOT/FAA/AM-11/9. FAA Civil Aerospace Medical Institute. Federal Aviation Administration. Oklahoma City, May 2011. Final Report. 28 p.
 Copeland K. CARI-7A: development and validation. Radiation Protec-Data Computer Science and Validation. Radiation Protection 2017.
- Copeland K. CARI-7A: development and validation. Radiation Protection Dosimetry. FAA (FAA's Civil Aerospace Medical Institute) 2017. P.1–13. doi:10.1093/rpd/ncw369 URL: https://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/aeromedical/radiobiology/cari7
- 46. Copeland K. CARI-7 documentation: particle spectra. Report № DOT/ FAA/AM-21/4. Civil Aerospace Medical Institute FAA. March 2021. Office of Aerospace Medicine Federal Aviation Administration 800 Independence Ave., S.W. Washington, DC 20591. 21 p. /_Copeland K. CARI-7 documentation: radiation transport in the atmosphere. Report № DOT/FAA/AM-21/5 March 2021. Civil Aerospace Medical Institute FAA. Office of Aerospace Medicine Federal Aviation Administration 800 Independence Ave, S.W. Washington. 30 p. URL: http://www.faa. gov/go/oamtechreports/
- Mares V., Maczka T., Leuthold G., Rühm W. Air Crew Dosimetry with a New Version of EPCARD. Radiat Prot Dosimetry. 2009;136;4:262-266. doi: 10.1093/rpd/ncp129.
- 48. Sovilj M.P., Vuković B., Radolić V., Miklavčić I., Stanić D. Potential Benefit of Retrospective Use of Neutron Monitors in Improving Ionising Radiation Exposure Assessment on International Flights: Issues raised by Neutron Passive Dosimeter Measurements and EPCARD Simulations during Sudden Changes in Solar Activity. Arh Hig Rada Toksikol. 2020;71;2:152-157. doi: 10.2478/aiht-2020-71-3403.
- Kiefer J. On the Biological Significance of Radiation Exposure in Air Transport. Radiation Protection Dosimetry. 1993;48;1:107-110. doi: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a081851

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки. Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов. Поступила: 20.02.2025. Принята к публикации: 25.03.2025.

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: 20.02.2025. Accepted for publication: 25.03.2025.

Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2025. Том 70. № 3

69