

УДК 551.388

ДОЗИМЕТРИЯ ПРИ АВИАПЕРЕЛЁТАХ

М.А. Морозова¹, В.Б. Лапшин¹, С.В. Доренский, А.В. Сыроешкин¹

При полетах на гражданских самолетах человек поднимается на высоту до 13 километров, теряя при этом экранирующую защиту земной атмосферы, что приводит к существенному росту дополнительного облучения. Радиационная нагрузка при авиаперелетах может превышать фоновую наземную в 100 раз в зависимости от маршрута авиалайнера. На высоте 10 км фоновые значения могут превышать 300 мкР/ч (3 мкЗв/ч), что больше, чем в зоне отчуждения ЧАЭС (70 мкР/ч) и сопоставимо с уровнем радиации в окрестностях АЭС Фукусима (250 мкР/ч) [1]. Опаснее всего длительные перелёты над полярными областями. При солнечных вспышках, сопровождающихся солнечными протонными событиями, и иных гелиогеофизических событиях мощность дозы облучения вторичными космическими лучами может превышать фоновую в 100000 раз [2].

Настоящий обзор всесторонне освещает проблему дозиметрии при авиационных перевозках, начиная с постановки вопроса необходимости оценки доз, прогноза радиационной обстановки, заканчивая изложением государственных механизмов регулирования радиационной безопасности авиаперелетов, а также стратегии применения радиопротекторов и адаптогенов для профилактики последствий облучения пассажиров. Большое внимание уделено как описанию первичного космического излучения, так и процессам формирования вторичных космических лучей, которые являются основным радиационным фактором, воздействующим на экипажи и пассажиров. Отдельный раздел посвящен методам детектирования электромагнитных излучений и корпускулярных потоков с учетом особенностей условий измерений – приведена классификация приборов, описаны принципы работы, основные рабочие параметры, в том числе диапазон измерений. Представлен обзор результатов исследований ведущих европейских и американских научных групп по измерению мощности эффективных доз при авиаперелетах по различным маршрутам на средних и высоких широтах при разных уровнях солнечной активности. Рассмотрены вопросы радиотоксикологии: механизмы токсического воздействия различных видов ионизирующего излучения на клеточном и организменном уровнях, зависимости между дозой и эффектом; приведены данные популяционных исследований в когортах членов экипажей коммерческих авиакомпаний.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ДОЗИМЕТРИЯ, АВИАПЕРЕЛЕТ, ВТОРИЧНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ, РАДИОТОКСИКОЛОГИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Фоновое облучение человека формируется за счет воздействия естественных и искусственных источников (рис. 1). Основную часть облучения население земного шара получает от естественных источников радиации. Большинство из них таковы, что избежать облучения от них невозможно, поэтому в среднем население Земли получает годовую эквивалентную дозу около 1 мЗв [3].

Естественный фон ионизирующего излучения формируется за счет потока космических лучей и излучений от природных радиоактивных веществ, распределенных в горных породах, почвах, атмосфере; не последнее место занимают и радионуклиды, инкорпорированные в тканях человека.

Естественный фон обусловлен как внешним, так и внутренним облучением. Внешнее облучение формируется за счёт воздействия на организм внешних по отношению к нему источников (космическое излучение и естественные радионуклиды в горных породах, почве, атмосфере и др.). Внутреннее облучение возникает за счёт воздействия на организм излучений естественных радионуклидов, находящихся в организме (⁴⁰K и радионуклиды семейства ²³⁸U и ²³²Th, поступающие в организм с воздухом, пищей и водой). Внутреннее облучение создаёт примерно 40 % естественного фона, около 60 % приходится на внешнее облучение (рис. 2) [4].

Земные источники ионизирующего излучения в сумме ответственны за большую часть естественного радиоактивного воздействия, которому подвергается человек. В среднем они обеспечивают более 5/6 годовой эквивалентной дозы, получаемой населением, в основном, за счет внутреннего облучения. Остальную часть вносят космические лучи, главным образом путем внешнего облучения [4].

¹ Морозова Мария Андреевна, научный сотрудник, ФГБУ «ИПГ», 8(499)181-50-90, gor-mariya@yandex.ru.

¹ Лапшин Владимир Борисович, д.ф.-м.н., профессор, директор ФГБУ «ИПГ», тел.: (499) 187-81-86, e-mail: director@ipg.geospace.ru.

¹ Сыроешкин Антон Владимирович, д.б.н., профессор, заместитель директора по научной работе ФГБУ «ИПГ», тел.: (499)1813966, e-mail: syroeshkin@ipg.geospace.ru.

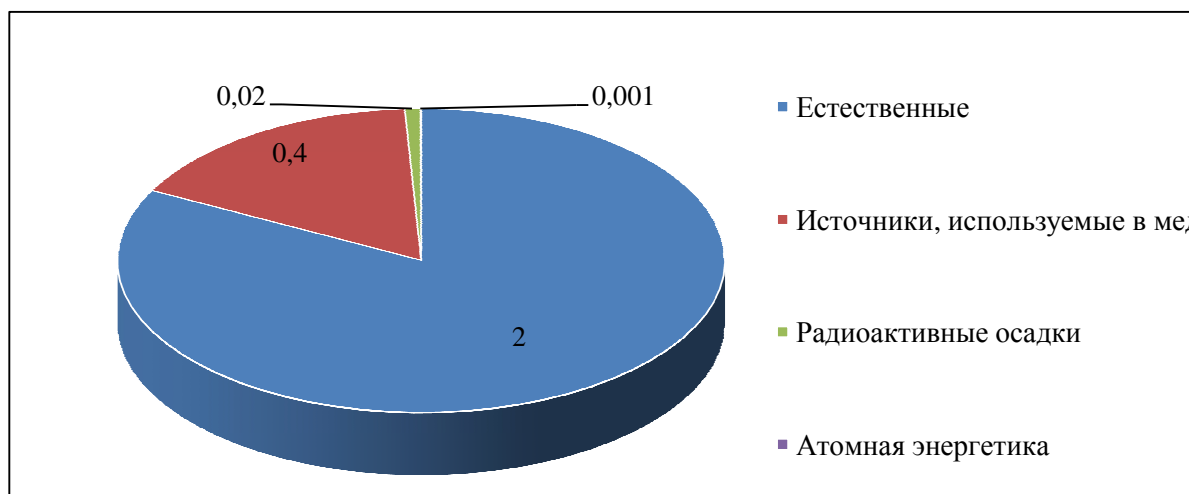


Рис. 1. Средние годовые эквивалентные дозы облучения от естественных и техногенных источников радиации (мЗв/год) [3]

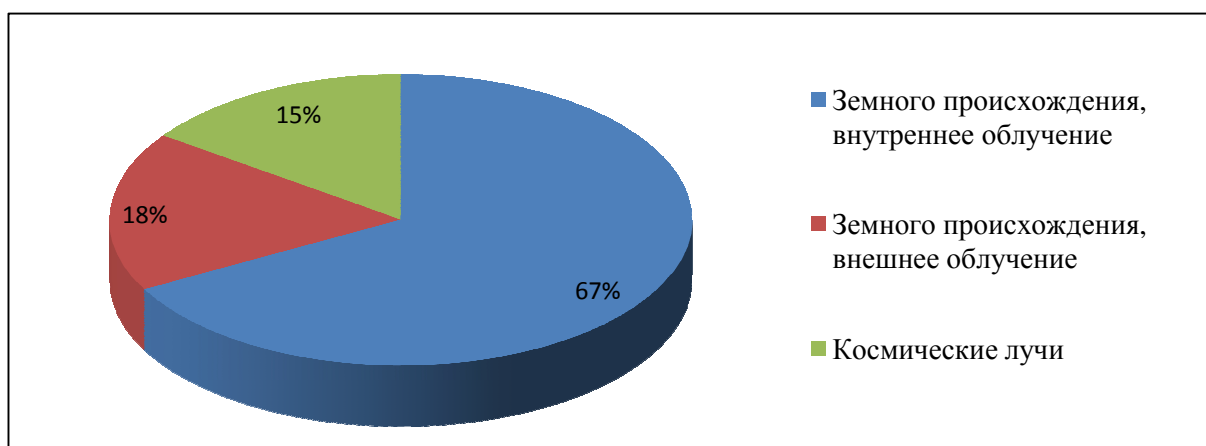


Рис. 2. Распределение среднегодовых эквивалентных доз облучения от естественных источников радиации [3]

Космические лучи (КЛ) открыты австрийским физиком В. Гессом более 90 лет назад. Используя пилотируемый воздушный шар, который поднимался на высоту до 5 км над уровнем моря, Гесс обнаружил присутствующее в атмосфере ионизирующее излучение. Позднее было доказано, что основными причинами возникновения радиационного излучения в атмосфере являются — (а) высокоэнергичные заряженные частицы, которые попадают в атмосферу Земли из-за пределов Солнечной системы (до 95% КЛ); (б) солнечные протонные события, представляющие собой интенсивные потоки высокоэнергичных заряженных частиц, испускаемых Солнцем во время солнечных вспышек и выбросов корональных масс (около 5% КЛ) [5].

Первичный компонент космических лучей образуется вследствие извержения и испарения материи с поверхности звёзд и туманностей космического пространства. Он состоит в основном из протонов и ядер лёгких атомов, большинство из которых обладают очень высокой энергией — в интервале $3 \cdot 10^9$ – $15 \cdot 10^9$ эВ, а некоторые отдельные частицы до 10^{19} эВ. Однако основную массу космических лучей, достигающих поверхности земли, составляет вторичное космическое излучение (см. раздел 2) [4].

Потоки первичных космических лучей проникают в атмосферу Земли и сталкиваются с молекулами и атомами воздуха. Столкновения приводят к образованию большого количества вторичных энергичных частиц (пионов, мюонов, нейтронов и др). По мере проникновения все глубже в атмосферу каскадный процесс последовательной генерации вторичного ионизирующего излучения усиливается, достигая максимума на высоте около 20 км над уровнем моря. Ниже 20 км эффективность

этого явления начинает постепенно снижаться из-за потерь энергии вследствие взаимодействия частиц [5].

На высотах от 6 до 13 км, где проходят эшелоны существенной части современного парка гражданских самолетов, используемых на внутренних и международных рейсах, уровень облучения, даже при спокойной геофизической обстановке, остается в десятки раз выше, чем на поверхности Земли (фоновые уровни 3–40 мкЗв/час, экстремальные, во время сильных солнечных вспышек, порядка 1 мЗв/час). Для сравнения, люди, живущие на уровне моря, получают в среднем эквивалентную дозу от космического излучения около 0,3 мЗв в год или примерно 0,03 мкЗв/ч. Для людей, живущих на высоте выше 2 км над уровнем моря, это значение в несколько раз больше. Заметим, что 4 км — максимальная высота, на которой ещё расположены поселения людей на склонах Эвереста. При подъеме с 4 км до 12 км (высота полета трансконтинентальных авиалайнеров) доза космического излучения возрастает примерно в 25 раз (табл. 1) [6, 7]. Очевидно, что пассажиры и летный персонал в процессе полетов получают дополнительные дозовые нагрузки от проникающего космического излучения галактического и солнечного происхождения [8].

Таблица 1. Мощность эквивалентной дозы космического излучения в зависимости от высоты и широты местности, мЗв/год [6]

Высота над уровнем моря, км	Экватор	30° северной широты	50° северной широты
0	0,3	0,4	0,5
1	0,6	0,7	0,9
2	1,0	1,3	1,7
3	1,7	2,2	3,0
4	2,6	3,6	5,0
5	4,0	5,8	8,0
10	14	23	45
15	30	50	110
20	35	60	140

Как видно из таблицы 1, мощность дозы КЛ зависит не только от высоты над уровнем моря, но также от геомагнитной широты, причем в высоких широтах (полярных областях) мощность дозы выше. Например, на высоте 10 км мощность эквивалентной дозы на экваторе в три раза ниже, чем на 50° с.ш. (табл. 1). Это обусловлено особенностями структуры магнитосферы Земли, в которой среди прочего выделяют области северного и южного полярного овала, иначе — полярного каспа. Здесь процесс проникновения частиц солнечного ветра протекает особенно эффективно, приводя к повышению потока вторичного ионизирующего излучения в атмосфере, а, следовательно, и к увеличению мощности дозы (рис. 3).

Зависимость величины амбиентного эквивалента дозы от условий солнечной активности при заданных значениях жесткости геомагнитного обрезания и относительной высоте исследована в работе [10]. Авторами показано, что прямая зависимость между величиной дозы и географической широтой наблюдается только в высокоширотной области — выше 60°. Накопленные экспериментальные данные для величины гелиоцентрического потенциала от 472 до 1322 МэВ показывают уменьшение мощности дозы при переходе от условий минимальной солнечной активности к максимальной.

Во время сильных солнечных вспышек самолеты, трассы которых проходят над полярными регионами (рис. 4) подвергаются воздействию высоких уровней радиации, что может привести к неблагоприятным последствиям как для экипажа, многократно попадающего в эту зону, так и для пассажиров, нормативы разового облучения для которых могут быть превышены в случае экстремальных событий [11].

Несмотря на существование данной проблемы, количество трансполярных перелетов в последние десять лет стремительно возрастает. И связано это, в первую очередь, с существенной экономией топлива и выигрышем во времени [11].

Термин «трансполярный» применим к рейсам, маршруты которых проходят над областью Северного полюса, а именно над регионом, расположенным севернее 78° с.ш. (рис. 4). Трансполярные полеты самолетов гражданской авиации стали возможными после окончания холодной войны. До этого

времени все рейсы из Северной Америки в Азию проходили в обход арктического региона, в связи с тем, что область над Арктикой считалась буферной зоной между Советским Союзом и США (рис. 4). В 1993 году для управления международными рейсами, проходящими над территорией России, была образована российско–американская координационная группа по вопросам воздушных перевозок (RACGAT), а в 1998 году открыто четыре трансполярных маршрута. Ежегодные трансполярные авиаперевозки выросли с 402 рейсов в 2000 году до 8527 рейсов в 2009 году, сейчас эта цифра превышает 10 тысяч в год. Новые трансполярные маршруты, обеспечивая короткие пути между многими североамериканскими и азиатскими городами, позволили снизить затраты на топливо и открыли новые возможности на рынке пассажирских авиаперевозок, однако значимость проблемы обеспечения безопасности на этих маршрутах при этом возросла на порядки [13].

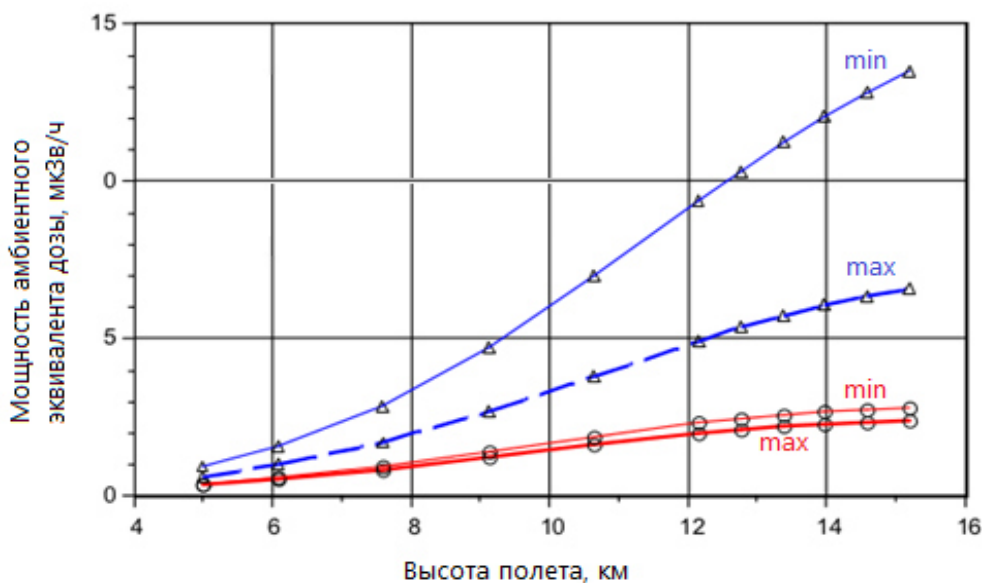


Рис. 3. Рассчитанная зависимость мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы от высоты при условиях максимальной (январь 1990 г.) и минимальной (январь 1998 г.) солнечной активности на долготе нулевого меридиана в полярной области и на экваторе: треугольники — область полюса, окружности — экваториальная область [9]

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 [8].

Подводя итог, отметим, что в настоящее время наблюдается быстрый рост числа пассажиров, перевозимых на самолетах. Так, согласно данным международной ассоциации воздушного транспорта (IATA), в 2010 году количество авиапассажиров составило 1,8 миллиарда человек, из которых 40% — пассажиры международных авиарейсов. Действующие нормативы допустимых уровней облучений говорят о том, что для различных групп населения существует риск получения сверхнормативной дозы во время полета. [11]. Дополнительные дозовые нагрузки пассажиров и летного персонала от проникающего космического излучения галактического и солнечного происхождения необходимо учитывать и контролировать для оценки коллективных эквивалентных доз и неблагоприятных последствий облучения [8].

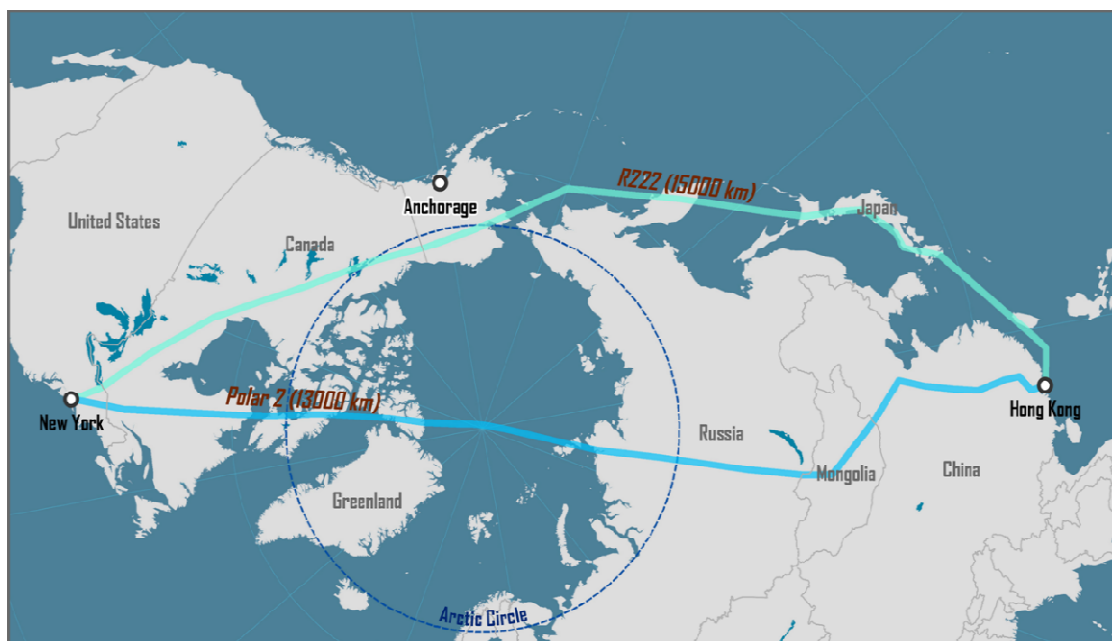


Рис. 4. Воздушные трассы Нью-Йорк — Гонконг: вне- и трансполярная [12]

1. КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРИЧНЫХ НЕЙТРОНОВ В АТМОСФЕРЕ

Первичные космические лучи представляют собой поток ядерных частиц, приходящих на земную поверхность из различных областей мирового пространства. Средняя энергия космических лучей составляет 10^{10} эВ. В общем потоке частиц встречаются и менее энергичные частицы, и частицы с энергией до 10^{19} эВ. Протоны (92%), электроны, нейтрино, α -частицы (7%), а также более тяжёлые атомные ядра составляют *первичное космическое излучение*.

Основными источниками *первичных космических лучей* являются взрывы сверхновых звёзд (галактические космические лучи) и Солнце. Большие энергии (до 10^{16} эВ) галактических космических лучей объясняются ускорением частиц на ударных волнах, образующихся при взрывах сверхновых звезд. Природа космических лучей сверхвысоких энергий пока не имеет однозначной интерпретации. На рисунке 5 показан спектр всех частиц первичных галактических лучей (www.nmdb.eu). В широком диапазоне энергий спектр аппроксимируется соотношением $dN/dE \sim E^{-2.7}$. Особый интерес представляют области энергий 10^{15} – 10^{16} эВ так называемое «колено» (knee) и 10^{18} – 10^{19} эВ — «лодыжка» (ankle). Эти особенности, вероятно, выделяют космические лучи разного происхождения.

Протоны с энергиями намного выше 10^{15} эВ и ионы выше 10^{18} эВ, как полагают, приходят не из нашей Галактики. Космические лучи с энергией до нескольких ГэВ приходят от Солнца и других источников в нашей Галактике. Спектр изогнут в этом диапазоне энергий, поскольку доступ к внутренней части солнечной системы галактических лучей определяется солнечным магнитным полем. Для энергий значительно выше 10 ГэВ доступ галактических лучей к внутренней солнечной системе не зависит от солнечного магнитного поля. Эти частицы имеют широкий спектр, что отражается в виде практически прямой линии на графике. Непрерывный поток космических лучей до 10^{19} эВ приходит на Землю изотропно.

Состав и энергии частиц, составляющих космические лучи показаны в табл. 2.

Как было отмечено выше, Солнце является источником постоянного потока частиц. Нейтрино, электроны, протоны, альфа-частицы, а также более тяжёлые атомные ядра — все вместе составляют корпускулярное излучение Солнца [14]. Значительная часть этого излучения представляет собой более или менее непрерывное истечение плазмы, так называемый «солнечный ветер», являющийся продолжением внешних слоев солнечной атмосферы — солнечной короны. Вблизи Земли его скорость составляет обычно 400–500 км/с. Средняя концентрация солнечного ветра 5,4 иона на 1 см^3 , ионная температура 160 000 К.

Таблица 2. Характеристики космических лучей до входа в атмосферу (первичные космические лучи)

	Галактические космические лучи	Солнечные космические лучи
Поток	$\sim 1 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Во время солнечных вспышек может достигать $\sim 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
Состав	1. Ядерная компонента — ~90% протонов, ~10% ядер гелия, ~1% более тяжелых ядер 2. Электроны (~1% от числа ядер) 3. Позитроны (~10% от числа электронов) 4. Антиадроны <1%	98-99% протоны, ~1.5% ядра гелия
Диапазон энергий	$10^6 - 10^{21}$ эВ	$10^5 - 10^{11}$ эВ

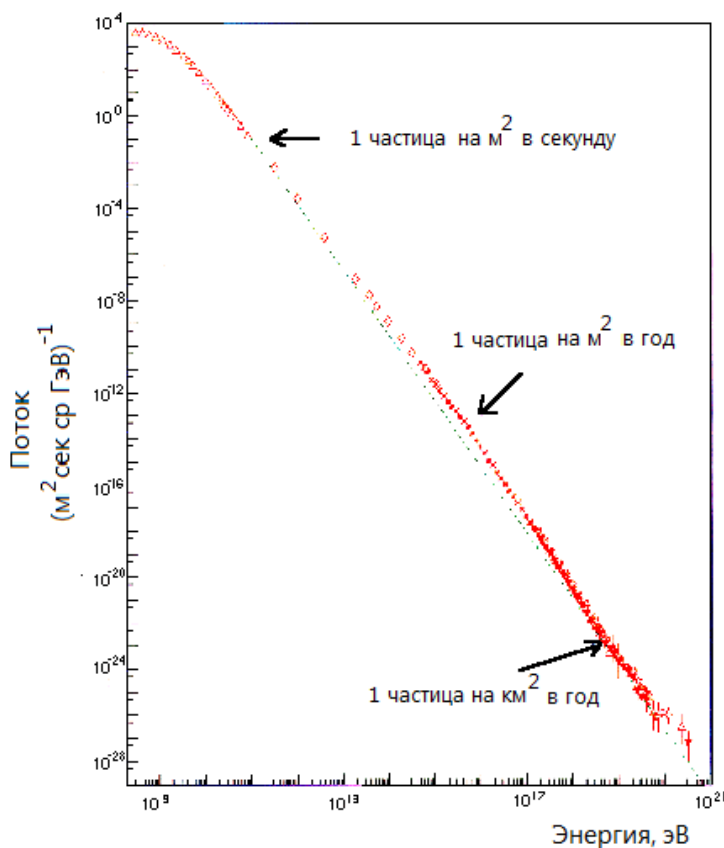


Рис. 5. Спектр космических лучей

На фоне постоянного плазменного ветра отдельные области на Солнце являются источниками дополнительных корпускулярных потоков. Они связаны с особыми областями Солнечной короны — корональными дырами, а также, возможно, с долгоживущими активными областями на Солнце [15, 16, 17].

Солнце вращается с периодом 27 суток. Траектории движения частиц солнечного ветра, движущихся вдоль линий индукции магнитного поля, имеют спиральную структуру, обусловленную вращением Солнца. В дни солнечных бурь солнечный ветер резко усиливается. Он вызывает полярные сияния и магнитные бури на Земле, и представляет угрозу для космонавтов при выходе в открытый космос.

Все планеты солнечной системы заключены в образованную солнечным ветром гигантскую гелиосферу. Землю защищает от солнечного ветра магнитосфера [15, 18]. Солнечный ветер как ионизованный, но электрически нейтральный газ, захватывает солнечное магнитное поле, которое заполняет окосолнечное пространство и образует межпланетное квазирегулярное магнитное поле. Космические лучи, распространяясь в таком поле, рассеиваются на движущихся со скоростью сол-

нечного ветра магнитных неоднородностях и выносятся за пределы гелиомагнитосферы. Доля частиц, которая достигает орбиты Земли, будет тем меньше, чем меньше энергия частиц. Плотность магнитных неоднородностей сильно зависит от уровня солнечной активности. В конечном счете, наблюдаемая интенсивность космических лучей внутри гелиомагнитосферы определяется уровнем солнечной активности и энергией частиц [19].

Когда на Солнце происходит вспышка, увеличивается интенсивность коротковолновой части электромагнитного излучения, к Земле устремляются космические лучи и высокоскоростной поток частиц плазмы, впереди которого идёт ударная волна. Электромагнитное излучение достигает Земли за 10 минут, через одни — двое суток Земля встречается с возмущённым солнечным ветром [18]. Деформация поверхности магнитосферы, вызванная высокоскоростным потоком солнечного ветра, может привести к резким изменениям в собственном магнитном поле Земли и, как к следствию, — началу магнитной бури.

Галактические космические лучи рассеиваются на магнитных неоднородностях, распространяющихся с солнечным ветром. Число таких неоднородностей изменяется с 11-летней периодичностью солнечной активности. Длительные наблюдения всемирной сетью нейтронных мониторов показали, что поток галактических космических лучей имеет аналогичное изменение: когда число солнечных пятен высокое, поток галактических космических лучей снижается, и наоборот (рис. 6). Это так называемая солнечная модуляция галактических космических лучей в связи с распространением энергичных частиц в динамическую среду гелиосферы. Турбулентное межпланетное магнитное поле отклоняет космические лучи гораздо более эффективно, чем в периоды низкой активности, когда магнитное поле более постоянно. Сильные колебания магнитного поля приводят не только к сокращению интенсивности космических лучей, идущих во внутреннюю гелиосферу и к Земле, но и изменяют их.

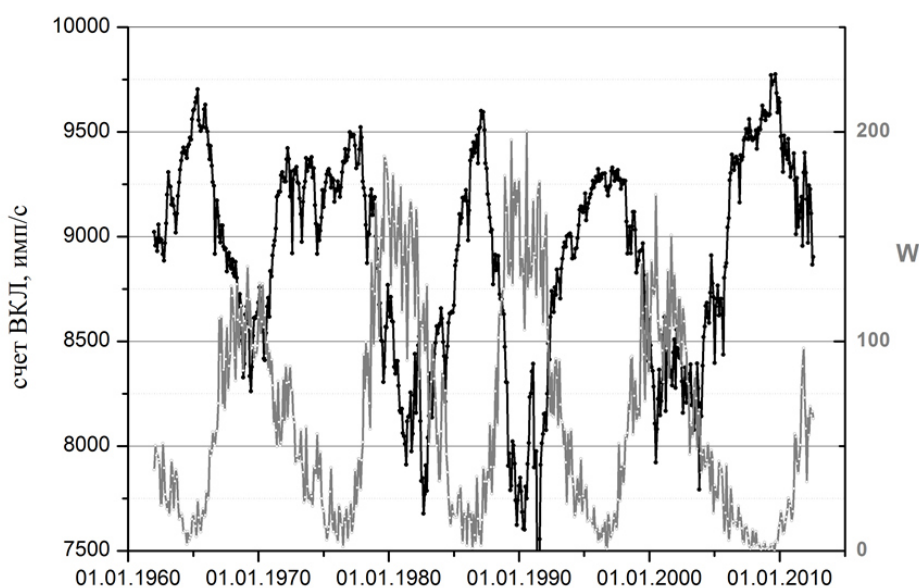


Рис. 6. Динамика изменения солнечной активности (правая шкала — число Вольфа, SIDC, RWC Belgium, World Data Center for the Sunspot Index, Royal Observatory of Belgium, `year(s)-of-data') и счета вторичных космических лучей (ВКЛ) на московском нейтронном мониторе (г. Троицк, ИЗМИРАН)

Наиболее впечатляющим проявлением эруптивной солнечной активности являются выбросы корональной массы (ВКМ, англ. CME). Распространяющиеся через гелиосферу корональные выбросы вещества также уменьшают поток галактических космических лучей. Это уменьшение галактической компоненты носит название «Форбуш понижения» по имени физика Скотта Форбуша. Понижение потока космических лучей происходит из-за сложных структур магнитного поля внутри и вокруг ВКМ и ударной волны, двигающейся впереди него.

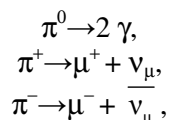
Солнечные вспышки проявляются путем внезапной яркости в различных диапазонах электромагнитного спектра. Солнечные вспышки и выбросы корональной массы взаимозависимы.

Вторичные частицы, индуцированные протонами высоких энергий могут быть зарегистрированы нейтронными мониторами на поверхности Земли. Усиление нейтронного потока может быть обу-

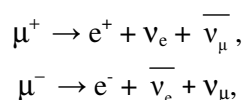
словлено солнечной вспышкой и выбросом корональной массы. Такие события, где Солнце ускоряет заряженные частицы с такой энергией, что они могут быть обнаружены нейтронным монитором или другими детекторами частиц на Земле, называются Ground Level Enhancements (GLE) [20].

Рассмотрим механизм формирования вторичных космических лучей (ВКЛ). При столкновении частиц космических лучей с молекулами воздуха *генерируются вторичные частицы*, которые в свою очередь взаимодействуют с другими молекулами воздуха. Это порождает каскад вторичных космических лучей. Чем глубже частицы проникают в атмосферу, тем больше энергии они теряют. Для генерации значительного числа вторичных частиц, которые смогут достичь уровня моря, первичные космические лучи должны иметь минимальную энергию около 0,45 ГэВ. Для возникновения вторичного космического излучения наиболее существенными являются электронно-фотонные и электронно-ядерные процессы. При электронно-фотонном процессе заряженные частицы космических лучей, взаимодействуя с полем ядра, порождают γ -фотоны, которые образуют электрон-позитронные пары, которые, в свою очередь, порождают новые γ -фотоны. Этот каскадный процесс нарастания числа частиц и фотонов продолжается до снижения их энергии из-за потерь на ионизацию и возбуждение атомов и молекул воздуха.

Типичный каскад вторичных космических лучей показан на рисунке 7 [18, 19]. Электронно-ядерный процесс обусловлен взаимодействием первичных космических частиц с энергией более 3 ГэВ с ядрами атомов воздушной среды, приводящим к возникновению протонов, нейтронов и пионов (заряженных (π^\pm) и нейтральных (π^0), масса пиона составляет 273 массы электрона, время жизни π^\pm — 25 нс, π^0 — 2,5 фс. Заряженные пионы распадаются на более устойчивые мюоны и нейтрино, нейтральные пионы — на 2 γ -фотона.



Мюоны распадаются на электроны, позитроны и нейтрино.



Некоторые мюоны подвергаются ядерным взаимодействиям и производят нейтроны (n). Мюоны взаимодействуют с ядрами атомов атмосферы в наименьшей степени, и поэтому они — наиболее распространенные вторичные космические лучи на уровне моря.

Таким образом, в результате взаимодействия с ядрами атмосферы первичные космические лучи (в основном протоны) создают большое число вторичных частиц — *пионов, протонов, нейтронов, мюонов, электронов, позитронов и фотонов*. При этом вместо одной первичной частицы возникает большое число вторичных частиц, которые делятся на адронную, мюонную и электронно-фотонную компоненты. Такой каскад покрывает большую территорию и называется широким атмосферным ливнем (рис. 8).

В одном акте взаимодействия протон обычно теряет ~50% своей энергии, а в результате взаимодействия возникают в основном пионы. Каждое последующее взаимодействие первичной частицы добавляет в каскад новые адроны, которые летят преимущественно по направлению первичной частицы, образуя адронный кор ливня. По мере приближения к поверхности Земли интенсивность первичного космического излучения уменьшается, а интенсивность вторичного излучения достигает максимума на высоте 20–30 км. На меньшей высоте поглощение вторичного излучения преобладает над генерацией. Поверхности Земли в основном достигают релятивистские мюоны. Электронно-фотонная компонента поглощается сильнее.

Один протон с энергией $> 10^{14}$ эВ может создать 10^6 – 10^9 вторичных частиц. На поверхности Земли адроны ливня концентрируются в области порядка нескольких метров, электронно-фотонная компонента — в области ~100 м, мюонная — нескольких сотен метров. Поток космических лучей на уровне моря примерно в 100 раз меньше потока первичных космических лучей ($\sim 0,01 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) [20].



Рис. 7. Широкий атмосферный ливень [20]

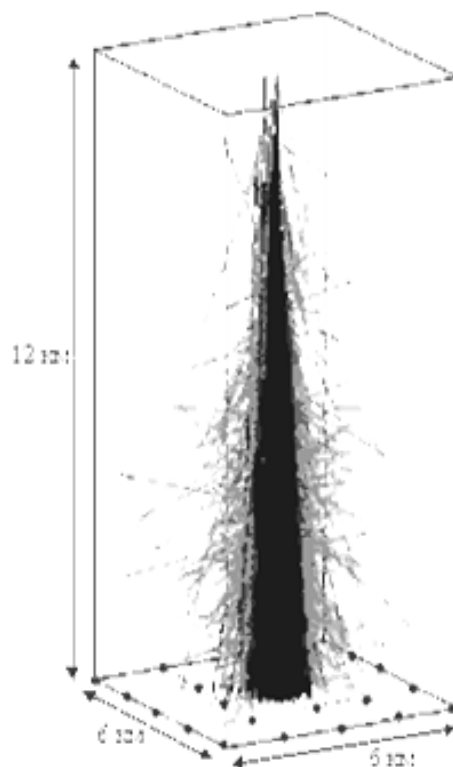


Рис. 8. Пространственное распределение компонент широкого атмосферного ливня [20]

Что касается состава вторичных космических лучей на высотах гражданских авиарейсов, где их воздействию наиболее активно подвергаются экипажи и пассажиры воздушных судов, то он весьма сложен и включает как различные виды электромагнитного излучения, так и потоки элементарных частиц (мюонов, электронов, протонов, нейтронов). Так в работе авторов Schraube H., Heinrich W. представлены результаты определения относительного вклада различных типов излучений в величину общей эффективной дозы от космических лучей (рис. 9) [21].

Расчеты в программе EPCARD приведены для целого ряда рейсов гражданских воздушных судов из Мюнхена и Франкфурта при максимальной и минимальной солнечной активности. Показано, что на высоте 11 км адронная компонента (протоны и нейтроны) космических лучей составляет более 50% от общей дозы облучения. Если принять взвешивающий коэффициент для протонов равным 5, как того требует МКРЗ (публикация ICRP60) и Директива Совета 96/29/EURATOM, то вклад протонной компоненты излучения в величину эквивалентной дозы можно считать вторым по важности после нейтронной, а полный вклад адронной компоненты космических лучей будет составлять до 80% от общей эквивалентной дозы [21]. Переход от условий солнечного максимума к состоянию минимальной солнечной активности не значительно изменяет соотношение различных компонентов ионизирующего излучения и их вклад в величину эквивалентной дозы [22, 23].

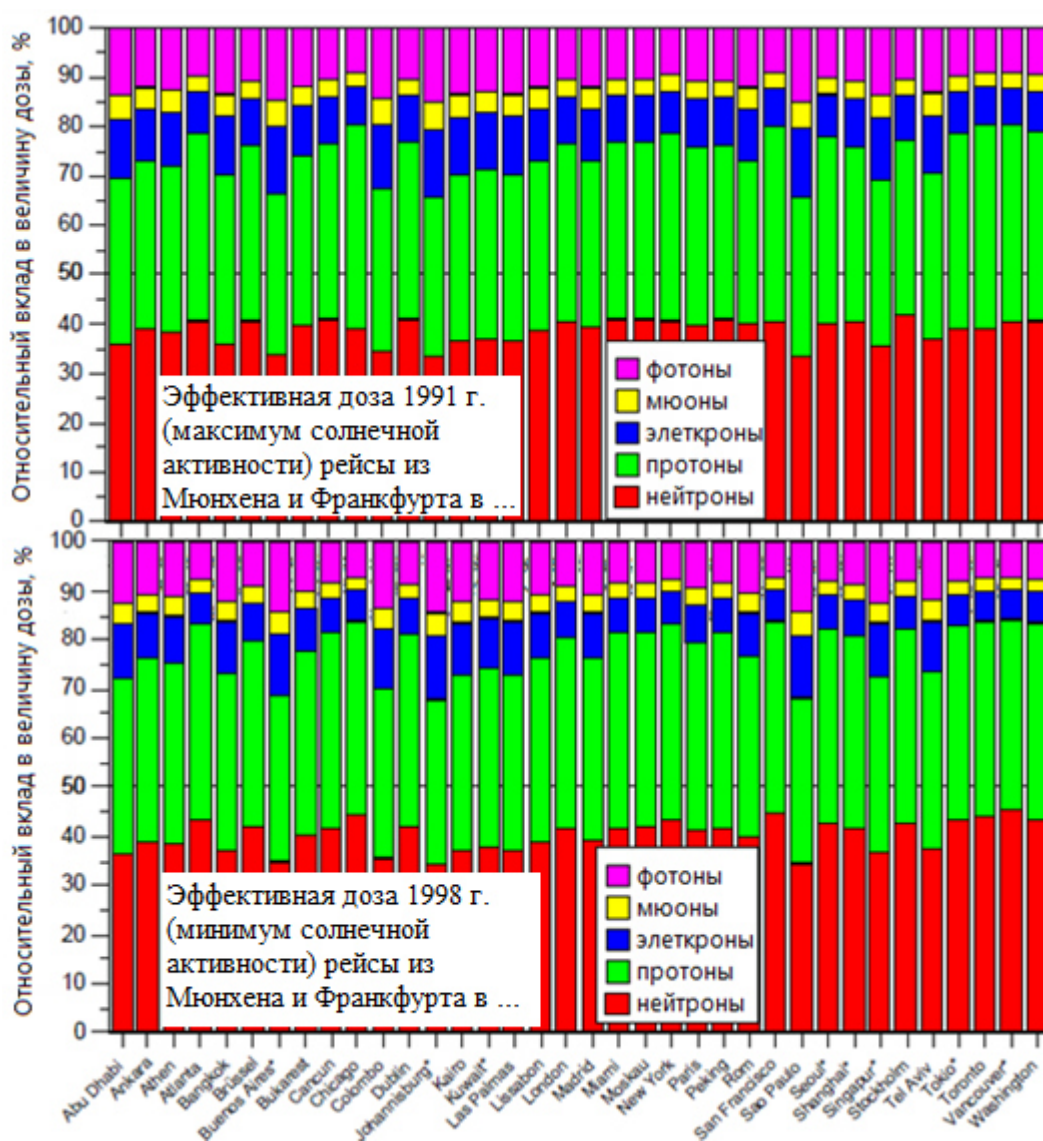


Рис. 9. Относительный вклад в величину эффективной дозы различных компонент космических лучей в условиях максимума (1991 г.) и минимума (1998 г.) солнечной активности на высоте 11270 м по данным расчета EPCARD v3.2 [21]

Однако различные проявления эруптивной солнечной активности, такие как, Форбуш понижения и GLE события, на высотах эшелонов судов гражданской авиации заметно отражаются на интенсивности потока ВКЛ, а, следовательно, и на мощности дозы ионизирующего излучения (табл. 3). Можно заметить, что адронная составляющая вторичных космических лучей в большей степени подвержена изменению под влиянием солнечных событий, чем их же электромагнитная составляющая.

Таблица 3. Влияние солнечных протонных событий и Форбуш понижений на величины доз ионизирующего излучения (по результатам измерений на борту самолетов Чешских авиалиний в 2001 и 2003 годах) [5]

Маршрут, дата и условия полета			Отношение значения измеренной дозы (полупроводниковый спектрометр) к значению дозы, рассчитанной по данным программы EPCARD		
			<i>электромагнитное излучение</i>	<i>адронная компонента</i>	<i>Суммарная доза</i>
Прага (PRG) — Нью-Йорк (JFK)	14.04.2001	нет события	1.00	0.96	0.98
JFK — PRG	16.04.2001	нет события	1.01	1.01	1.01
PRG — JFK	15.04.2001	GLE 60	1.24	1.68	1.44
PRG — JFK	12.04.2001	Форбуш	0.92	0.78	0.84
PRG — JFK	6.11.2001	Форбуш	0.89	0.85	0.87
PRG — София (SOF)	25.10.2003	нет события	0.95	1.00	0.98
SOF — PRG	29.10.2003	Форбуш	0.88	0.62	0.74

2. МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ВЫСОТАХ АВИАПЕРЕЛЕТОВ

Детекторы ионизирующих излучений классифицируют, прежде всего, по методу регистрации, т.е. по эффекту, используемому в детекторе для преобразования энергии. В качестве альтернативного критерия возможно использовать состояние среды. Выделяют следующие виды детекторов:

1. Ионизационные детекторы:

а) ионизационные камеры, газоразрядные счетчики (пропорциональные, Гейгера-Мюллера, искровые, дрейфовые и т.д.);

б) жидкостные ионизационные камеры, пузырьковые камеры и детекторы;

в) полупроводниковые детекторы, кристаллические детекторы, фотодетекторы;

2. Радиoluminesцентные детекторы: сцинтилляционные счетчики с органическими и неорганическими детекторами, люминесцентные камеры, термoluminesцентные и фотoluminesцентные детекторы и т.п.

3. Счетчики черенковского излучения;

4. Химические детекторы;

5. Зарядовые (эмиссионные) детекторы, вторичные электронные умножители и т.п.

6. Калориметрические детекторы;

7. Радиодефекционные детекторы, основанные на использовании дефектов в веществе, возникающих под действием излучений.

8. Активационные детекторы, основанные на их активации исследуемым излучением с последующим измерением связанного с ним вторичного излучения [24].

Наиболее широкое распространение в силу своей информативности получили *пропорциональные ионизационные, полупроводниковые и сцинтилляционные детекторы*. В них процесс преобразования энергии происходит в два этапа: на первом частица теряет в детекторе часть энергии ΔE , а на втором происходит преобразование ΔE в заряд на выходе детектора. Второй этап обычно слабо зависит от вида регистрируемых частиц и определяется собственными свойствами детектора. Весьма важным параметром, определяющим качество детектора, является средняя энергия, расходуемая в нем на образование пары первичных носителей заряда — ϵ . Чем меньше значение ϵ детектора, тем меньшую энергию с большей точностью он способен измерить (табл. 4) [25].

Из таблицы 4 видно, что полупроводниковые детекторы — абсолютные лидеры по чувствительности среди других типов детекторов.

Рассмотрим кратко принципы работы основных видов детекторов ионизирующего излучения.

Таблица 4. Параметры преобразования энергия-заряд пропорциональных детекторов [25]

Вид детектора	Е, эВ
<u>ППД</u>	
Ge (T=100°K)	2,96
Si (T=300°K)	3,67
<u>Газонаполненные</u>	
Воздух	32
Аргон	26
Криптон	23
Ксенон	21
<u>Сцинтилляционные</u>	
LaBr ₃ (Ce)	15
NaI(Tl)	26
CsI(Tl)	56
CdWO ₄	85
BGO	111
Антрацен	250
Li J(Eu)	330
Стильбен	500
Пластические сцинтилляторы	400-800
Жидкие сцинтилляторы	1000-1500

Ионизационная камера — газовый детектор, позволяющий измерять ионизационные потери заряженных частиц или потери энергии гамма-квантом. Измерение производится посредством разделения рожденных пар носителей заряда в электрическом поле и их движения к аноду и катоду, где регистрируются соответствующие электрические сигналы.

Существует большое количество разновидностей камер в зависимости от предназначения. Они отличаются как конструкционно (плоские, цилиндрические, сферические, многоэлектродные), так и по роду наполняющего газа (воздух, аргон, трехфтористый бор и т.д.) и его давлению.

Например, малогабаритные камеры с малым количеством газа, ионизация которого обусловлена, главным образом, электронами или другими заряженными частицами, выбитыми из стенок камеры первичным излучением, применяются для измерения ионизации от γ , β и нейтронных потоков. При измерении мягкого рентгеновского излучения применяются камеры с входным окном из алюминиевой фольги, непрозрачной для α и мягкого β – излучений.

Ионизационные методы измерения потоков быстрых нейтронов основаны на использовании энергии ядер отдачи, образующихся при упругом рассеивании нейтронов (наиболее эффективно на атомах водорода). При регистрации нейтронов водородсодержащее вещество, например, слой парафина, помещают на внутренние стенки камеры. Быстрые нейтроны могут также регистрироваться по протонам отдачи в объеме камеры, заполненной водородом или гелием под давлением в несколько атмосфер.

Для регистрации медленных нейтронов внутренние стенки камеры покрывают слоем ^{10}B . Используется реакция $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ ($\sigma = 3840$ барн). Высокую эффективность регистрации нейтронов обеспечивают борные камеры, наполненные трифторидом бора (BF_3), обогащенным легким изотопом ^{10}B . Импульсная ионизационная камера, наполненная изотопом гелия ^3He , вследствие большого сечения реакции $^3\text{He}(n, p)\text{T} - 5330$ барн для тепловых нейтронов и благодаря хорошим свойствам гелия как газа-наполнителя, также позволяет регистрировать медленные нейтроны с высокой точностью.

Для спектрометрии γ -квантов успешно применяются ксеноновые ионизационные камеры, обладающие высоким энергетическим разрешением (от 4 до 2% при изменении энергии γ -квантов с 300 до 1500 кэВ).

Одна из модификаций, предназначенная для регистрации как тепловых и быстрых нейтронов, так и нейтронов высокой энергии, камера деления — это ионизационная камера с внутренним слоем делящего материала, такого, как ^{235}U . По большому энерговыделению (≈ 165 МэВ), характерному для деления ядер, можно выявлять нейтроны на фоне других частиц. Регистрацию нейтронов часто осложняют трудности отделения их от гамма-излучения. Эффективность регистрации в однослойной камере деления даже для тепловых нейтронов невелика и камеры деления часто делают многослойными.

Газоразрядный пропорциональный счетчик — прибор для регистрации ионизирующих излучений, создающий сигнал, амплитуда которого пропорциональна энергии регистрируемой частицы, теряемой в объеме газа на ионизацию. За счет газового усиления в этом приборе преодолевается основной недостаток газовой камеры — очень низкие токи, что даёт возможность регистрировать частицы с энергией < 10 кэВ, в то время как сигналы от частиц таких энергий в ионизационных камерах «тонут» в шумах усилителя.

Работа пропорционального счётчика основана на явлении газового усиления — увеличения количества свободных зарядов в объёме детектора за счёт того, что первичные электроны на своём пути к аноду в больших электрических полях приобретают энергию достаточную для ударной ионизации нейтральных атомов рабочей среды детектора. Возникающие при этом новые электроны, в свою очередь, успевают приобрести энергию достаточную для ионизации ударом. Таким образом, к аноду будет двигаться нарастающая электронная лавина. Это «самоусиление» электронного тока (коэффициент газового усиления) может достигать 10^3 – 10^4 [26].

Пропорциональные счетчики применяются, главным образом, в счетном режиме. Счетная характеристика пропорционального счетчика качественно подобна вольтамперной характеристики ионизационной камеры и имеет протяженное плато, соответствующее регистрации всех частиц данного вида, прошедших через счетчик.

Счетчик Гейгера-Мюллера — газонаполненный счётчик заряженных элементарных частиц, электрический сигнал с которого усилен за счёт вторичной ионизации газового объёма счётчика и не зависит от энергии, оставленной частицей в этом объёме. Изобретён в 1908 г. Х. Гейгером и Э. Резерфордом, позднее усовершенствован Х. Гейгером и В. Мюллером.

Конструктивно счётчик Гейгера устроен также как пропорциональный счётчик, т.е. представляет собой конденсатор, с сильно неоднородным электрическим полем. Функционально счётчик Гейгера также повторяет пропорциональный счётчик, но отличается от последнего тем, что за счёт более высокой разности потенциалов на электродах работает в таком режиме, когда достаточно появления в объёме детектора одного электрона, чтобы развился мощный обусловленный вторичной ионизацией лавинообразный процесс, который способен ионизовать всю область вблизи нити-анода. При этом импульс тока достигает предельного значения и не зависит от первичной ионизации. Развиваясь лавинообразно, этот процесс завершается образованием в межэлектродном пространстве электронно-ионного облака, резко увеличивающего его проводимость. При этом коэффициент газового усиления может достигать 10^{10} , а величина импульса десятков вольт [27].

Дрейфовая камера — представляет собой координатный детектор. Это многопроволочный газонаполненный ионизационный детектор, в котором координата частицы определяется по времени дрейфа электронов в газе от места ионизации (пролёта частицы) до сигнальных нитей-анодов.

В отличие от пропорционального счетчика в дрейфовой камере создаётся однородное электрическое поле. Пролёт частицы через камеру фиксируется по стартовым сигналам внешних детекторов (чаще всего сцинтилляционных счётчиков). Появившиеся в объёме камеры свободные электроны дрейфуют в однородном и постоянном поле, в непосредственной близости от анодных нитей происходит образование лавин (газовое усиление достигает 10^6) и по времени задержки относительно стартового сигнала определяются координаты частицы. Пространственное разрешение дрейфовой камеры порядка 0,1–0,2 мм, временное — наносекунды.

Плоские дрейфовые камеры больших размеров используются в экспериментах на ускорителях высоких энергий. Например, в ЦЕРНе разработана дрейфовая камера размером 2x4x5 м.

Искровая камера — прибор для наблюдения и регистрации траекторий (треков) заряженных частиц. Широко используется для исследования ядерных частиц и космических лучей. Представляет собой набор параллельных проводящих пластин, разделённых газом и электрически изолированных друг от друга

Полупроводниковый детектор представляет собой ионизационную камеру, чувствительный объём которой является твердым телом. Наибольшее распространение получили полупроводниковые детекторы из кристаллов кремния (плотность $3,3$ г/см³) и германия ($5,3$ г/см³). В основе работы такого детектора лежит ионизация твердого тела, которая приводит к появлению в полупроводнике зарядов, а затем к изменению его проводимости. Из-за более высокой плотности их вещества (в 10^3 раз) и меньшей энергии образования пары носителей (около 3 эВ вместо 34 эВ для воздуха) поглощенная энергия в единице объема полупроводникового детектора примерно в 10^4 раза больше, чем в газовом детекторе. Это и определяет основное преимущество полупроводниковых детекторов — высокую чувствительность при малых размерах.

Сцинтиляционный детектор — детектор частиц, действие которого основано на регистрации световых вспышек в видимой или УФ-области, возникающих при прохождении ионизирующего излучения через сцинтиллятор. Доля энергии, конвертированная в световую вспышку, от полной энергии, потерянной частицей в сцинтилляторе, называется конверсионной эффективностью. Она является основным параметром сцинтиляционного детектора.

Сцинтиллятор может быть органическим (кристаллы, пластики или жидкости) или неорганическим (кристаллы или стекла). Используются также газообразные сцинтилляторы. В качестве органических сцинтилляторов часто используются антрацен ($C_{14}H_{10}$), стильбен ($C_{14}H_{12}$), нафталин ($C_{10}H_8$). Жидкие сцинтилляторы обычно известны под фирменными именами (например, NE213). Пластиковые и жидкие сцинтилляторы представляют из себя растворы органических флуоресцирующих веществ в прозрачном растворителе. Например, твердый раствор антрацена в полистироле или жидкий раствор п-терфенила в ксилоле. Концентрация флуоресцирующего вещества обычно мала и регистрируемая частица возбуждает в основном молекулы растворителя. В дальнейшем энергия возбуждения передается молекулам флуоресцирующего вещества. В качестве неорганических кристаллических сцинтилляторов используются ZnS, NaI(Tl), CsI, $Bi_4Ge_3O_{12}$, $LaBr_3(Ce)$, $PbWO_4$ и др. В качестве газовых и жидких сцинтилляторов используют инертные газы (Xe, Kr, Ar, Ne) и N.

С помощью сцинтилляционных счетчиков можно измерять энергетические спектры электронов и γ -лучей. Для измерения спектров тяжелых заряженных частиц (α -частицы и др.) обычно используют CsI. По сравнению с NaI, он существенно менее гигроскопичен и не требует защитного кожуха, в котором заряженные частицы теряют свою энергию [28, 29].

Счетчик черенковского излучения — принцип работы этого детектора основан на регистрации излучения, возникающего при движении заряженной частицы в прозрачной среде со скоростью, большей скорости света в этой среде. Черенковское свечение является когерентным электромагнитным излучением диполей, образующихся в результате поляризации атомов среды пролетающей заряженной частицей.

Основным элементом конструкции черенковского счетчика являются радиатор (вещество с коэффициентом преломления n , в котором движется исследуемая частица, фотоэлектронный умножитель и оптическая линза (системы линз)). Наиболее употребляемые материалы радиаторов: органическое стекло ($n = 1,5$), свинцовое стекло ($n = 1,5$), этиленгликоль ($n = 1,427$), вода ($n = 1,33$). У газов n существенно меньше — 1.002 (пентан). Использование кремниевых аэрогелей, однако, позволило охватить и этот недостающий диапазон показателей преломления. Достоинством черенковских счетчиков по сравнению с другими типами детекторов является высокая разрешающая способность по времени.

Калориметрические детекторы — предназначены для измерения полной энергии высокоэнергетичных частиц (в том числе нейтронов). Попав в вещество калориметра, частица рождает ливень вторичных частиц, передавая им свою энергию. Ливень поглощается в объеме калориметра и его энергия измеряется. К преимуществам калориметрических детекторов можно отнести:

- способность измерять энергии частиц в диапазоне от нескольких МэВ до максимально достижимой;

- относительное энергетическое разрешение калориметров увеличивается с ростом энергии как $E^{-1/2}$, где E — энергия падающей частицы;

- размеры калориметра увеличиваются с энергией логарифмически;

- чувствительность как к заряженным, так и к нейтральным частицам;

- при сегментации калориметра можно получить информацию о координатах частиц и струй.

Точность измерения координат оси ливня частиц повышается с ростом энергии и может быть лучше, чем 1мм. Возможно измерение как продольной, так и поперечной составляющих импульсов частиц. Калориметры также можно использовать как триггеры для селективного отбора событий (длительность сигналов на выводах ячеек калориметра ~10 и менее);

- возможность идентификации частиц, например, электронов, фотонов, пионов и мюонов.

По типу детектируемых частиц калориметры делятся на электромагнитные и адронные. Конструктивно калориметры подразделяются на гомогенные и гетерогенные — в гомогенных калориметрах поглощающий материал одновременно является и детектирующим, в гетерогенных калориметрах функции поглощения и детектирования разделены, что позволяет оптимальным образом выбрать поглотитель [30].

Трековые детекторы — группа детекторов, в которых при прохождении заряженной частицы возникает визуально наблюдаемый след (трек) этой частицы (табл. 5).

Таблица 5. Рабочие характеристики трековых детекторов

Детектор	Способ «усиления» трека	Минимальная энергия для образования элемента трека, эВ	Чувствительность, $(z/b)_{\min}$	Возможность управления чувствительностью; временное разрешение	Время памяти, с	«Мертвое время», с	Разрешение		Области применения
							энергетическое, %	пространственное, %	
Ядерная эмульсия	Проявление	10^3 на зерно	1	Ведутся разработки	От 10^2 до 10^3 ч	—	1	1	Ядерная физика средних и высоких энергий, космофизика, регистрация редких событий, поиск новых типов частиц
Диэлектрические трековые детекторы	Травление	10^5 – 10^6 на мкм трека	5	Нет	От 10^2 ч до ∞	—	1	10	Ядерная физика низких и средних энергий, космофизика, поиск новых типов частиц и сверхтяжелых ядер, прикладные исследования
Камера Вильсона	Рост капли на ионе	40–50 на каплю	1	Есть; 10^{-2} с	От 10 до 10^{-2} ч	1–30 с	1	100	Ядерная физика низких энергий, физика газового разряда, физика плазмы
Диффузионная камера	Рост капли на ионе	40–50 на каплю	1	-	Непрерывная чувствительность		1	100	Ядерная физика низких энергий, физика газового разряда, физика плазмы
Пузырьковая камера	Рост пузырька на локальном эффекте	$(3-5) \cdot 10^3$ на пузырек	1	Нет	—	1	1	100	Ядерная физика высоких энергий, поиск редких событий и новых частиц

К трековым детекторам относятся конденсаторные камеры (Вильсона и диффузионные), пузырьковые камеры, искровые и стримерные камеры, фотоэмульсии и трековые детекторы следов повреждений.

Механизмы действия трековых детекторов разнообразны. В камере Вильсона и диффузионной камере — это конденсация пересыщенного пара на ионах, образованных ионизирующей частицей в газе; в пузырьковой камере — вскипание перегретой жидкости в точках высокого локального энерговыделения на траектории частицы (≥ 1 кэВ); в стримерной камере — появление пространственно локализованных слабосветящихся электронных лавин (стримеров) размером менее 1 мм, которые вырастают в сильном импульсном электрическом поле на сгустках ионизации, созданных в газе заряженной частицей. В искровой камере вдоль колонки лавин (стримеров) происходит искровой пробой, так что след представляет собой яркий тонкий плазменный шнур.

Регистрация следов в трековых детекторах производится прямым фотографированием (в конденсационных, пузырьковых, искровых камерах), фотографированием с предварительным электронно-

оптическим усилением изображения (в стримерных камерах); с помощью микроскопа (ядерные фотоэмульсии и детекторы следов повреждений).

К недостаткам трековых детекторов относятся необходимость поиска событий и сложность анализа изображения следа. Автоматизация этих процессов сопряжена с трудностями, что сдерживает скорость просмотра и обработки больших массивов данных.

Камеры Вильсона и пузырьковые камеры. При подходящих условиях ионизация, произведённая в веществе заряженной частицей, может вызвать в нем фазовый переход. В детекторе, называемом камера Вильсона используется принцип конденсации жидкости из пара. Прибор был изобретён в 1912 году Ч. Вильсоном, в течение многих лет исследовавшим физику образования облаков в атмосфере. Проходя через перенасыщенный пар, заряженная частица оставляет за собой след из капелек. За 1 мс капельки вырастают до видимых размеров. В начале 1950-х годов Д. Глейзер, исходя из аналогии с камерой Вильсона, нашёл иной фазовый переход, который тоже позволяет визуализировать следы частиц. В его приборе используется перегретая жидкость, которая вскипает вблизи центров зародышеобразования, которыми служат ионы. Проходя через такую жидкость, частица оставляет за собой след из пузырьков.

Пузырьковые камеры и камеры Вильсона позволяют видеть следы частиц. Это означает, что положение частицы может быть определено с точностью до размера видимой капельки или пузырька, т.е. примерно до 1 мм. Камеры часто помещают в магнитное поле. Это приводит к искривлению траекторий заряженных частиц, обратно пропорциональному их импульсу. При этом положительно заряженные частицы отклоняются в одном направлении, а отрицательно заряженные — в другом. Таким образом, в дополнение к пространственной картине, которую дают эти приборы, они позволяют измерить импульс частицы и определить знак её заряда.

Для измерения потока нейтронов в космосе используют, так называемые «*бэбл-дозиметры*». Бэбл-дозиметр — это прибор, в форме толстого карандаша, наполненный густым гелем, состоящий из пузырьковых «бэбл-детекторов» и электронного блока считывания, и хранения информации. Под воздействием нейтронов в геле возникают пузырьки, (по-английски "бэбл", отсюда и название детектора). Прибор предназначен для измерения вклада в дозу частиц космического излучения с высокими энергиями (преимущественно нейтронов и тяжёлых частиц) [31]. Их помещают в различных отсеках космического корабля, где они экспонируются в течение некоторого времени, данные записываются на карту памяти, которую затем экипаж спустит на Землю. Подсчёт числа пузырьков осуществляется при помощи бортового пульта; дозовая чувствительность не менее 1 пузырьёк/мБэр [32].

Ядерные эмульсии — состоят из желатина и взвешенных частиц кристаллического бромистого серебра (AgBr) размером до 0,3 мкм, но в отличие от последних имеют существенно большую толщину — до нескольких сотен микрон (толщина обычных эмульсий 10 мкм). Заряженные частицы, проходя через слой эмульсии, ионизуют атомы, лежащие на их пути. В результате происходит разложение бромистого серебра и образование центров скрытого изображения. При последующей проявке в эмульсии образуются мельчайшие зёрна металлического серебра размером до 1 мкм, которые наблюдаются под микроскопом в виде точек различной жирности. След частицы имеет вид цепочки таких точек со средним расстоянием между ними, не превышающим 5 мкм. По характеру этого следа (концентрации точек и отклонению от прямолинейности) можно идентифицировать тип частицы.

Эмульсии часто облучают стопками, что позволяет получать 3-х мерную реконструкцию трека. Благодаря большой концентрации серебра плотность фотоэмульсий довольно велика, а поэтому потери энергии высокоэнергичных частиц даже на сравнительно небольшом пробеге в эмульсии могут достигать десятков и сотен МэВ [33].

Плотность следа (число почерневших зерен на единицу его длины) прямо пропорциональна ионизации, производимой падающей частицей и, следовательно, зависит от ее энергии. Кроме того, в результате многочисленных столкновений с атомами эмульсии траектория частицы обнаруживает отклонения. По результатам измерения плотности следа и его отклонений можно определить массу и заряд частицы, тем самым идентифицировав ее.

Трековые детекторы следовых повреждений (ДСП, твердотельные трековые детекторы). Проходя сквозь вещество, частицы могут буквально «расталкивать» атомы на своём пути и оставлять за собой след, видимый в электронном микроскопе. Впервые подобные треки наблюдались в слюде [20].

Физической основой метода является образование в микроструктуре материала детектора узких зон нарушенного радиацией вещества — латентных (скрытых) треков. Непосредственное наблюдение таких треков очень малого диаметра возможно с помощью электронного микроскопа, а также

путем специального окрашивания деструктурированного радиацией вещества. Однако эти методы весьма трудоемки, часто для визуализации треков используют обычный оптический микроскоп после соответствующего травления облученных детекторов [34].

Значение химического травления заключается в том, что вещество в треке удаляется значительно быстрее, вследствие чего образуется кратер, величина которого в зависимости от продолжительности травления и энергии частицы, может достигать несколько микрон. Существует два метода травления: чисто химическое и электрохимическое. Наиболее употребляемые травители полимерных детекторов – гидроксиды щелочных металлов (NaOH, KOH, KMgO). Скорость травления зависит от концентрации травителя и его температуры (табл. 6).

Таблица 6. Характеристики твердотельных трековых детекторов

Материал	Травитель	Концентрация травителя, %	Температура травления, °С	Время травления, мин	Температура отжига треков, °С	Наименее ионизирующий ион, образующий трек (с энергией, МэВ)
Кристаллы:						
оливин MgFeSO ₄	WO ₄	—	100	600	480	⁵⁶ Fe (100)
кварц SiO ₂	NAOH	60	160	240	500	⁴⁰ Ar (100)
слюда KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	HF	50	20	60	500	²⁰ Ne (2)
Топаз Al ₂ SO ₄ (F,OH) ₂	NAOH	60	160	120	—	—
Стекла:						
кварцевые SiO ₂	HF	50	20	6	500	²⁰ Ar (16)
хрусталь SiO ₂ , PbO (24%)	HF	3,5	20	8	300	Z≈14
флинт	HF	5,7	23	3	—	²⁰ Ne (2-3)
Полимеры:						
полиэтилен	K ₂ CrO ₇ +H ₂ S O ₄	—	85	30	—	Осколки деления
янтарь	K ₂ CrO ₇ +H ₂ S O ₄	3,5	28	2400	300	Осколки деления
полиамид	KMnO ₄	—	60	480	260	¹⁶ O (36)
ацетат целлюлозы	NaOH	25	40	60	160	⁴ He (3)
нитрат целлюлозы	NaOH	25	40	60	138	¹ H (0,55)

С помощью широко применяемых ДСП (слюда, пластик) можно регистрировать только частицы с линейной передачей энергии более ~ 4–5 кэВ/мкм. Это соответствует протонам с энергией менее 20 МэВ (что позволяет регистрировать и быстрые нейтроны по протонам отдачи), альфа-частицам с энергией менее 50 МэВ и ядрам с Z > 6 любых энергий [35, 36].

Наиболее подходящим материалом ДСП является полиаллил дигликоль карбонат более известный, как CR-39. Его наиболее чувствительные модификации позволяют регистрировать нормально падающие на детектор протоны с энергией ниже 27 МэВ (рис. 10) [37, 38].

Наибольшую трудность при дозиметрических измерениях вторичных космических лучей на высотах коммерческих авиарейсов представляет подбор универсального детектора, который позволил бы охватить все виды фотонных и корпускулярных потоков, присутствующих в атмосфере на данной высоте.

В 2004 году одна из рабочих групп DOSEMAX при европейской комиссии, опубликовала результаты многолетних исследований (1993–2003) по изучению воздействия космического излучения на экипажи воздушных судов. В отчет вошли результаты более 20 исследовательских коллективов из ведущих научных центров, проводивших разработку программного обеспечения для расчета доз, разработку и калибровку детекторов космических лучей, дозиметрические измерения на коммерческих авиарейсах, расчеты величин эквивалентной дозы и AMBIENTного эквивалента дозы [9].

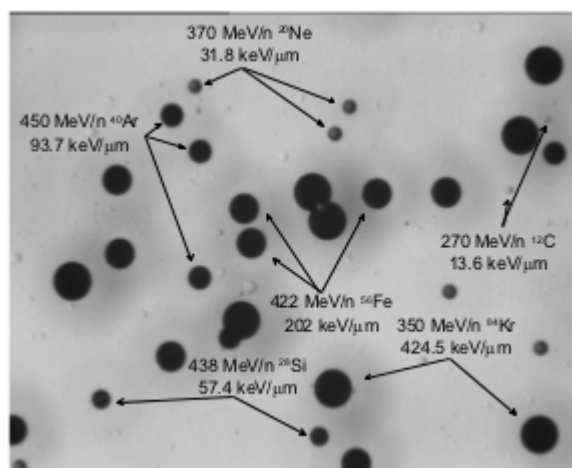


Рис. 10. Пример реконструкции событий с помощью детектора CR-39

В заключение приведем таблицу сравнительных характеристик различных детекторов.

Таблица 7. Сравнительные характеристики некоторых детекторов

Детектор	Пространственное разрешение, см	Временное разрешение, с
Ионизационная камера	1	10^{-6}
Пропорциональный счетчик	1	10^{-7}
Счетчик Гейгера	1	10^{-6}
Сцинтилляционный счетчик	1	10^{-9}
Полупроводниковый детектор	1	10^{-9}
Фотоядерные эмульсии	10^{-4}	
Камера Вильсона	10^{-1}	10^{-1}
Диффузионная камера	10^{-1}	1
Пузырьковая камера	10^{-2}	10^{-3}
Искровая камера	10^{-2}	10^{-6}
Пропорциональная камера	10^{-2}	10^{-7}

Согласно представленному докладу [9] для измерения радиационного фона на борту самолета используются две группы приборов — *электронные* (активные) устройства, позволяющие определять, как мощность эквивалентной дозы (мкЗв/ч) в течение полета в режиме реального времени, так и дозу, полученную за весь маршрут (мкЗв), и *пассивные детекторы*.

В качестве примера электронных устройств можно привести — тканеэквивалентные пропорциональные счетчики (ТПС), ионизационные камеры, нейтронные мониторы, счётчики Гейгера-Мюллера, полупроводниковые детекторы. Как уже было сказано выше, принцип их действия основан на фиксации изменений электрических зарядов, возникающих в результате действия проходящего ионизирующего излучения. Электрический ток или заряд, генерируемый в электронных детекторах очень мал, а сами детекторы отличаются повышенной хрупкостью. С оборудованием такого типа необходимо обращаться очень осторожно. Характерной особенностью электронных устройств является потребность в электропитании (аккумуляторной батарее или подключении к системе электропитания самолета). Установка на борту самолета оборудования такого рода должна проводиться в соответствии с определенными регламентами и нормативами и требует наличия специализированного разрешения [5].

Второй тип — пассивные детекторы. Приборы этого типа накапливают дозу от прохождения сквозь них частиц ионизирующего излучения, причем результат оценивают после полета с использованием специализированного оборудования. Детекторы радиации без электронных компонентов отличаются прочностью и компактностью, что делает их удобными для использования на борту самолета. Тем не менее, они уступают по чувствительности электронным приборам. Для повышения чувствительности используют несколько сложенных вместе пассивных детекторов и/или

проводят оценку дозы после их использования в процессе нескольких перелетов. Примеры пассивных детекторов, используемых в авиационной дозиметрии — термоллюминесцентный детектор, «баббл» детектор, твердотельный пластиковый трековый детектор (чаще всего на основе полиаллил дигликоль карбоната). Специально для дозиметрии вторичных космических лучей были разработаны детекторы на основе нейтрон-индуцированных реакций деления ядер висмута и золота, позволяющие селективно регистрировать высокоэнергичные нейтроны [5].

Для проведения измерений радиационного фона на борту самолета необходимы приборы, чувствительные как к нейтронам, так и к электромагнитному излучению с низкой линейной передачей энергии (ЛПЭ). Очевидно, что если детектор чувствителен только к одному определенному виду излучения из всех, которые можно зафиксировать на борту самолета, необходимо использовать несколько различных типов откалиброванных датчиков.

Некоторые виды аппаратуры, такие как тканеэквивалентные пропорциональные счетчики, кремниевые полупроводниковые спектрометры, рекомбинационные ионизационные камеры, способны детектировать компоненты дозы, как с низким, так и с высоким значением ЛПЭ. Преимуществом этих датчиков является способность устанавливать примерное распределение ЛПЭ или определять среднее значение ЛПЭ, и, следовательно, используя коэффициент качества, рассчитывать эквивалентную дозу. По этой причине такого рода приборы, в частности, *тканеэквивалентные пропорциональные счетчики*, предложены в качестве *эталонных* для проведения измерений космического излучения.

Существуют различные способы создать тканеэквивалентную среду. Чаще всего ионизационные камеры наполняются газом, который по своему атомному составу близок к мягкой биологической ткани. В работе [39] использована смесь метана, углекислого газа и азота. Международная комиссия по радиационным единицам (МКРЕ) в качестве стандартного шарового фантома рекомендует сферу диаметром 30 см, изготовленную из тканеэквивалентного материала с плотностью 1 г/см^3 следующего массового состава: 76,2 % O_2 , 11,1% C , 10,1 % H_2 и 2,6% N_2 .

Тканеэквивалентный пропорциональный счетчик, разработанный в королевском военном колледже (Канада) — прибор, позволяющий проводить комплексное измерение всего спектра смешанного радиационного поля космических лучей. С его помощью определяли не только величину эквивалентной дозы, но также и микродозиметрическое распределение радиационного излучения в зависимости от значения показателя линейной передачи энергии [39]. Диапазон измерений счетчика 0,144–14,8 МэВ. В таблице 8 представлены результаты калибровки счетчика в опорном нейтронном поле.

Таблица 8. Результаты калибровки тканеэквивалентного пропорционального счетчика, разработанного королевским военным колледжем (Канада) в опорном полиэнергетическом нейтронном поле [39]

Источник	Номинальная мощность дозы, мкЗв/ч	Измеренная мощность дозы, мкЗв/ч	Относительная ошибка, %
^{252}Cf	996±24	1165	16.9
Am(Be)	11.8±0.6	14.2	20.6

При отсутствии универсального детектора Международная комиссия по радиационной защите в публикации ICRP140 [9] рекомендует использовать альтернативный подход, согласно которому в целях дозиметрии предлагается разделить радиационное поле ГКЛ на компоненты с низкими значениями ЛПЭ ($\leq 5 \text{ кэВ/мкм}$) и высокими значениями ЛПЭ ($\geq 5\text{--}10 \text{ кэВ/мкм}$). Другими словами, на две компоненты с не резко выраженными отличиями — не нейтронная компонента и нейтронная компонента (здесь также учитывается вклад в эквивалентную дозу высокоэнергичных протонов).

Для определения вклада в величину дозы излучения с низкими значениями ЛПЭ используются ионизационные камеры, сцинтилляционные счетчики, полупроводниковые детекторы и люминесцентные детекторы. Для излучений с высокими значениями ЛПЭ — нейтронные мониторы (с увеличенным энергетическим откликом), твердотельные трековые детекторы, «баббл» детекторы или фольговые детекторы деления. Характеристики некоторых из них приведены в таблице 9.

Таблица 9. Электронные устройства, используемые для измерения мощности дозы ионизирующего излучения на борту самолетов авиакомпании IBERIA [40, 41, 42, 43]

Аппаратура для дозиметрических измерений на борту самолета должна предоставлять возможность получения оперативных данных о величине эквивалентной дозы или амбиентного эквивалента дозы.

Прибор (название, производитель)	Тип детектора	Диапазон измеряемых энергий
<i>Излучения с низкими значениями ЛПЭ (электромагнитное ИИ)</i>		
RS131, Reutes Stokes	импульсная ионизационная камера	70 кэВ – 8 МэВ
Genitron Gamma Tracer, Genitron Instruments GmbH	счетчик Гейгера–Мюллера	45 кэВ – 1.3 МэВ
Eberline FH-40G, Thermo Scientific	пропорциональный газоразрядный счетчик	45 кэВ – 1.3 МэВ
<i>Излучения с высокими значениями ЛПЭ (нейтронное излучение)</i>		
Eberline SWENDI2, Thermo Scientific	³ He – трубка + замедлитель из вольфрама	до 5 ГэВ
SNM500X, MAB Linus	³ He – трубка + замедлитель из свинца	> 10 МэВ
NAWK, Far West Tech.	тканеэквивалентный пропорциональный счетчик (12,7 см в диаметре)	0.3 – 1024 кэВ·мкм ⁻¹

Амбиентный эквивалент дозы — эквивалент дозы, который может быть создан в шаровом фантоме МКРЕ на глубине d (мм) от поверхности по диаметру, параллельному направлению излучения, в поле излучения, идентичном рассматриваемому по составу, флюенсу и энергетическому распределению, но мононаправленному и однородному. Для сильно проникающего излучения рекомендуется величина $d = 10$ мм. Эквивалент амбиентной дозы используется для характеристики поля излучения в точке, совпадающей с центром шарового фантома.

При измерениях сложных радиационных полей особенно важно, что используемые приборы полностью аттестованы для измерений амбиентного эквивалента дозы. В идеале, для определяемых типов частиц отклик детектора должен быть изотропным и высокочувствительным. Приборы, чувствительные не ко всем радиационным компонентам, должны быть аттестованы на устойчивость сигнала к влиянию не детектируемых излучений. Характеристика отклика детекторов, как правило, проводится в национальных лабораториях по стандартизации. Для некоторых частиц, например, протонов, высокоэнергичных нейтронов и электронов невозможно провести калибровку прибора в лабораторных условиях, тогда допускается использование расчетных величин в комбинации с измерениями. Соответствие международным стандартам может быть определено при проверке в национальных лабораториях стандартов дозиметрии.

Вследствие отсутствия подходящих опорных полей излучений высоких энергий, информации относительно инструментального отклика на электроны и протоны публикуется мало. В опорных нейтронных полях ИСО может проводиться калибровка приборов вплоть до энергий 19 МэВ (iThemba LABS, Кейптаун; The Svedberg laboratory, Уппсала; Католический университет, Лувен-ля-Нев). Существующее в ЦЕРН (Европейский союз) стандартное поле нейтронного излучения имитирует спектр нейтронной компоненты вторичных ГКЛ в атмосфере на высотах авиаперелетов [9, 44].

Однако, не смотря на активную работу исследователей в области технологий интегральной оценки дозовой нагрузки от ГКЛ в зависимости от высоты, географической широты и активности солнца, идеального детектора все еще не создано [39–44]. Возможно, будущее за биологическими методами. Так в ряде работ уже решена задача поиска биологического объекта, наиболее адекватно реагирующего на неблагоприятные воздействия корпускулярного ионизирующего излучения и имеющего простую организацию. Доказано, что искусственное высокоактивное нейтронное облучение способно оказывать системное положительное воздействие на диапаузирующие цисты жаброного рачка *A.salina*, которое может тормозить или, наоборот, активизировать в нем генетические и физиологические процессы, такие как механохимическая генерация оболочки [45]. Показано, что комбинацию препаратов сухих живых и мертвых цист *A.salina* можно рассматривать в качестве биотестера интенсивного потока галактических космических лучей, воздействующего на человека при высотных полетах. Полученные данные о наиболее значимых механизмах устойчивости биотестера *A.salina* к неблагоприятным космогеофизическим воздействиям могут иметь определенное значение для понимания и анализа этих процессов у человека [46].

3. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ БОРТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МОЩНОСТИ ДОЗЫ ВТОРИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

В данном разделе представлен обзор экспериментальных данных, полученных европейскими и американскими исследовательскими группами в результате проведенных бортовых измерений мощности эквивалентной дозы при авиаперелетах по маршрутам на средних и высоких широтах, при разных уровнях солнечной активности.

Так, в работе [47] для определения мощности эквивалентной дозы за счет вклада нейтронной компоненты космических лучей использовали твердотельный трековый детектор на основе пластика CR-39 ($2 \times 3 \text{ см}^2$) в комбинации со слоем боразона — BN; в двух измерениях из пяти использовали также прибор для определения фотонной компоненты излучения — электронный дозиметр RAD-60 SE. Измерения проводили на 5 различных маршрутах. Маршрут 1 пролегал между 36° и 52° северной широты через следующие города: Загреб — Сплит — Рим — Реджо-ди-Калабрия — Мальта — Лондон. Средняя высота полета 10 км, общая продолжительность — 6,25 ч. Измеренная мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения составила $2,9 \pm 1,7$ мкЗв/час. Результаты расчета с использованием программы EPCARD — 3,2 мкЗв/час.

В январе 2008 года авиаперелет на судне МакДонелл Дуглас MD-82 по маршруту: Рас-эль-Хайма — Джидда — Стамбул — Дубровник (21° – 42° северной широты) [47]. Средняя высота полета 11 км, эффективное время экспозиции — 11,1 ч. Измеренная мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения составила $8,5 \pm 2$ мкЗв/час. Мощность эквивалентной дозы, создаваемая за счет фотонной компоненты, была измерена с помощью электронного дозиметра и оказалась равной 1,1 мкЗв/ч. Однако, согласно данным EPCARD, общая мощность эквивалентной дозы на данном маршруте оказалась равна 2,3 мкЗв/час.

В феврале 2008 года измерения проведены при перелете на Аэробусе А-320 и Аэробусе А-340 (высота 11 км) по маршруту Загреб–Франкфурт–Нью-Йорк (40° – 53° сев. ш.). За время полета (16,4 ч) вследствие воздействия нейтронной компоненты ГКЛ получена эквивалентная доза в 114,3 мкЗв. Расчет EPCARD дал значение мощности эквивалентной дозы, равное 6,5 мкЗв/час.

Март 2008 года, маршрут Загреб — Париж — Мехико — Тoluка — Мерида (Юкатан) — Канкун — Монтерей (32 – 58° сев. ш.), средняя высота полета 10–11 км, эффективное время экспозиции — 27,9 ч. Измеренная мощность эквивалентной дозы нейтронов — $4,6 \pm 0,9$ мкЗв/ч, мощность общей дозы, рассчитанная по EPCARD — 5,6 мкЗв/ч.

В сентябре 2008 года проведены измерения при перелете по маршруту Загреб — Амстердам — Торонто — Париж (44 – 53° сев. ш.), средняя высота 11 км, длительность — 17,7 ч. Среднее значение измеренной мощности эквивалентной дозы нейтронов составило 6,5 мкЗв/ч, фотонной компоненты — 1,6 мкЗв/ч. По данным EPCARD общая мощность эквивалентной дозы составила — 7,1 мкЗв/ч [47].

В работе [48] для определения фотонной компоненты космических лучей на борту самолетов А-320 и АTR-40 авторы использовали термолюминесцентный детектор (TLD-100 — фторид лития, активированный магнием и титаном) и полупроводниковый дозиметр MINI 6100; дозу нейтронного излучения определяли с помощью трекового детектора LR-115 в комбинации со слоем боразона. На маршруте Загреб — Париж — Буэнос — Айрес — Париж — Загреб общее время экспозиции составило 26,7 часов. При этом, дозиметр MINI 6100 показал среднюю мощность дозы, равную 2,3 мЗв/ч, TLD дозиметр зарегистрировал среднюю мощность дозы в 2,7 мЗв/ч; нейтронный детектор — 2,4 мЗв/ч. Использование той же аппаратуры в феврале 2005 года при 24-х часовом перелете в Японию (Загреб — Франкфурт — Токио и обратно) дало следующие результаты: дозиметр TLD — средняя мощность дозы составила 2,4 мЗв/ч; нейтронный дозиметр — 2,5 мЗв/ч. По проведенным оценкам за 500 летных часов в год экипаж воздушного судна (аэробус А-320) получает эквивалентную дозу в 1,64 мЗв.

Актуальная информация по дозиметрии нейтронной компоненты ГКЛ на трансполярном рейсе из Нью-Йорка в Сеул, осуществленного 5–6 ноября 2009 года, представлена в работе [49]. Бортовые измерения проводились с использованием современного переносного нейтронного монитора WENDI-II, Thermo Scientific [50] отличающегося высокой чувствительностью к нейтронам космических лучей. Общее время полета составило около 14 часов, максимальное значение мощности дозы, зарегистрированное во время перелета — 5,7 мкЗв/ч [49]. Графическое представление изменения мощности дозы с высотой показано на рисунке 11.

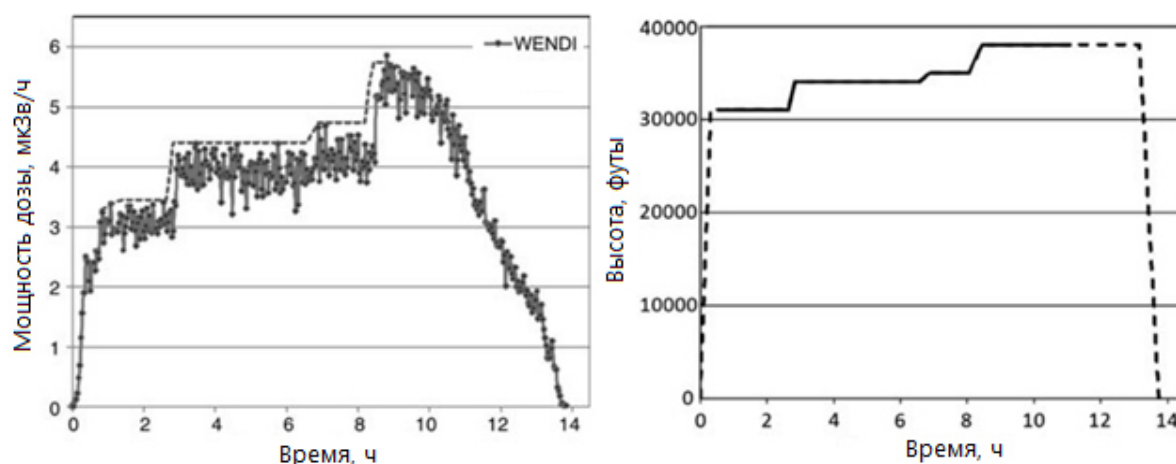


Рис. 11. Результаты бортовых измерений нейтронного излучения ГКЛ на трансполярном перелете Нью-Йорк – Сеул с использованием монитора WENDI-II [49]

Из результатов большинства рассмотренных работ стало очевидным, что на высоте эшелонов гражданских рейсов (9–12 км) мощность эквивалентной дозы вследствие влияния галактических космических лучей в среднем составляет от 5 до 10 мкЗв/ч, находясь при этом в зависимости от высоты, геомагнитной широты и солнечной активности [51–61].

В январе 2005 года на солнце произошло 5 мощных вспышек, в связи с которыми на уровне Земли можно было наблюдать значительные вариации интенсивности потоков вторичных космических лучей [62]. Пятая из этих вспышек (X7.1) породила энергичный поток солнечных космических лучей, которые вызвали гигантское увеличение нейтронного потока, зарегистрированное сетью нейтронных мониторов на Земле. На нейтронных мониторах, расположенных в высоких широтах южного полушария, увеличение счета нейтронов достигало нескольких тысяч процентов. Результаты исследования показали, что значение мощности эквивалентной дозы в области южного полюса (от 70 до 130° юж. ш.) на высоте пассажирского самолета превышало регулярные значения (5–10 мкЗв/ч) на три порядка, достигая величины в 3 мЗв/ч (GLE — событие 20.01.2005, в течение 10 минут, на высоте 9 км) [62].

В [63] представлены результаты определения эквивалентной дозы на высоте эшелона пассажирского самолета при GLE 68. Данные нейтронных мониторов, зафиксировавших это солнечное событие, были приняты за основу при проведении расчетов потенциальных доз (табл. 10, 11).

В работе [64] приведены результаты по оценке мощности дозы на высоте 10 км при GLE-событии 70, произошедшем 13 декабря 2006 года вследствие мощной рентгеновской вспышки на солнце (класс X3). Мощность эквивалентной дозы в областях высоких северных и южных широт достигала значения >40 мкЗв/ч. По приблизительным оценкам, эквивалентная доза, получаемая пассажирами при перелетах на трансполярных и североатлантических рейсах, во время данного события увеличилось, примерно, на 17-26%.

По данным [65] в рамках пяти исследовательских проектов (1995–2007), частично финансируемых Европейским союзом, проведена огромная работа, направленная на изучение радиационного облучения от ГКЛ и СПС. Значения мощности дозы, измеренные с высокой воспроизводимостью ($\pm 25\%$) во время регулярных авиарейсов, позволили валидировать созданные программные коды оценки дозовой нагрузки от ГКЛ по показателю воспроизводимости ($\pm 30\%$). При сравнении результатов, полученных от авиакомпаний, отобранных для участия в проектах согласно критерию стабильности летных условий, точность измерений оказалась равна 10%, в то время как точность определения мощности дозы ГКЛ по математическим моделям составила 20%. Таким образом, было установлено, что коды расчетов для оценки радиационного облучения от ГКЛ и СПС по-прежнему нуждаются в улучшении и сверке с данными бортовых измерений. В результате исследований установлено, что мощность амбиентного эквивалента дозы на обычных высотах полетов судов гражданской авиации составляет от нескольких до 10 мкЗв/ч. В среднем, годовая эквивалентная доза, как правило, составляет 1–2 мЗв для тех членов экипажей, которые летали на малые расстояния, и 3–5 мЗв для тех, кто обслуживал дальнемагистральные рейсы [65].

Таблица 10. Эквивалентная доза над каждым из нейтронных мониторов, накопленная за 7 часов на высоте 12200 м при GLE 68 [63]

Станция	Широта	Долгота	Геомагнитная широта	Жесткость геомагнитного обреза, ГэВ	Доза за 7 часов, мкЗв
Берн	46.95	98	47.85	4.42	7.0
Киль	54.33	10.13	54.51	2.36	32.0
Рим	41.86	12.47	42.10	6.27	1.0
Баренцбург	78.12	14.42	74.65	0.00	112.0
Оулу	65.05	25.47	61.83	0.77	142.0
Апатиты	67.55	33.33	62.89	0.55	129.0
Москва	55.47	37.32	50.87	2.30	32.0
Новосибирск	54.80	83.00	44.94	2.69	22.0
Норильск	69.26	88.05	59.02	0.53	92.0
Тикси	71.58	128.92	60.31	0.43	91.0
Якутск	62.02	129.72	51.86	1.63	51.0
Магадан	60.07	151.01	51.55	1.99	62.0
Мыс Шмидта	68.92	-179.47	63.66	0.52	116.0
Инувик	68.35	-33.72	70.93	0.14	119.0
Форт Смит	60.02	-111.93	67.17	0.30	138.0
Ньюарк	39.70	-75.70	50.36	2.21	38.0
Туле	76.50	-68.70	87.14	0.00	93.0
Наин	56.55	-61.68	67.03	0.45	154.0

Таблица 11. Потенциальные величины эквивалентных доз для пассажирских авиарейсов при GLE 68 [63]

Маршрут	Эквивалентная доза от GLE 68, мкЗв	Эквивалентная доза от ГКЛ, мкЗв	Общая доза, мкЗв
Париж — Вашингтон (B747)	53.1	39.4	92.5
Париж — Сан-Франциско (A340)	73.9	65.8	139.7
Токио — Париж (трансполярный перелет, B747)	49.8	61.8	111.7
Париж — Токио (через Сибирь, B747)	14.1	44.3	68.4
Париж — Осака (через Сибирь, A340)	21.2	52.2	73.4
Осака — Париж (через Сибирь, A340)	60.8	70.6	131.4
Лос-Анжелес — Нью-Йорк (B747)	15.2	61.8	77.0
Буэнос-Айрес — Париж (B747)	11.7	35.3	47.0

4. МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЗОВОЙ НАГРУЗКИ

Код *LWIN* представляет собой детерминистский подход, базирующийся на двухкомпонентном (продольные и поперечные компоненты) уравнении Больцмана, в решении которого используется ряд дифференциальных уравнений для определения флюенса первичных космических лучей в верхней части атмосферы в качестве граничного условия. Важным параметром являются вариации дозы в зависимости от величины вертикальной и невертикальной жесткости геомагнитного обрезания.

Код *LWIN* является основой программы *CARI*, которая была разработана Федеральным управлением гражданской авиации США (FAA) для оценки степени облученности членов экипажей. *CARI* позволяет рассчитать эквивалентную дозу галактического космического излучения, полученную физическим лицом (антропоморфный фантом) на борту воздушного судна за время полета. В качестве исходных параметров программа *CARI* запрашивает: время и эшелон полета, географические координаты аэропорта отправления и назначения, показатели солнечной активности во время полета. Наиболее часто используемая версия кода *CARI* предполагает геодезический маршрут между аэропортами. Версия *CARI-6M* рассчитывает дозу в соответствии с введенным пользователем планом маршрута, который должен включать географические координаты и высоты. Модель позволяет произвести расчет как мощности эквивалентной дозы в определенной точке, так и полную дозу, полученную за весь перелет. В качестве меры солнечной активности в расчетах используется значение гелиоцентрического потенциала, который определяется ежемесячно. В версии *CARI-6* применяется модель гелиоцентрического потенциала О'Брайена, которая характеризуется значениями гелиоцентрического потенциала (в МэВ) из таблиц FAA, строящихся по ежедневным данным нейтронных мониторов. В обеих версиях программы, *CARI-6* и *CARI-6M*, используются радиационно-весовые коэффициенты, предложенные МКРЗ в публикации ICRP 60 ($W_R=5$ для протонов).

Объединение метода Монте-Карло и кода *FLUKA* привело к созданию очередной компьютерной программы, позволяющей оценить дозу ионизирующего излучения, получаемую членами экипажей - *EPCARD 3.2*. В данной программе используются параметры только вертикальной жесткости геомагнитного обрезания. Расчеты *EPCARD* основываются на вычислениях *FLUKA*, использующих первичные спектры из [100], в которых солнечная модуляция определяется диффузионно-конвекционной моделью, разработанной NASA в космическом центре Джонсона. *EPCARD* позволяет рассчитать эквивалентную дозу, AMBIENTНЫЙ эквивалент дозы, а также определить вклад различных компонент поля в величину дозы, полученной физическими лицами вследствие воздействия космического излучения на высоте от 5000 до 25000 метров. В *EPCARD* также использованы весовые коэффициенты МКРЗ из публикации ICRP 60.

Код *PCAIRE* представляет собой экспериментальную модель, которая позволяет интерполировать значение мощности дозы для любого глобального положения (вертикальной жесткости геомагнитного обрезания), высоты (остаточной глубины атмосферы) и даты (солнечная модуляция) на основе обширного набора бортовых измерений, полученных с использованием тканеэквивалентного пропорционального счётчика. Для расчета дозы в программе *PCAIRE* между двумя аэропортами строится маршрут, для которого рассчитываются значения широты и долготы в каждый момент времени полета с минутной дискретностью. В данной модели используются следующие значения жесткости геомагнитного обрезания: усредненные за три эпохи или табличные данные модели геомагнитного поля NASA [101], интерполированные на географические координаты вдоль траектории полета. Полуэмпирическая модель *PCAIRE*, согласованная с результатами бортовых измерений, позволяет определить величины AMBIENTНОГО эквивалента дозы и эквивалентной дозы. *PCAIRE* использует весовые коэффициенты ICRP 60.

Система *SIEVERT* (фр.: *Système d'information et d'Evaluation par Vol de l'Exposition au Rayonnement cosmique dans les Transports aériens*) разработана по поручению федерального управления гражданской авиации Франции (DGAC). Работа этой системы построена следующим образом: на сервер, управляемый несколькими организациями — DGAC, Институтом радиационной защиты и ядерной безопасности (IRSN), Французским Полярным институтом (IPEV) и Парижской обсерваторией — поступает запрос от авиакомпании, где указан план полета определенного рейса. С комплексно управляемого сервера в авиакомпанию возвращается информация об эквивалентной дозе облучения для каждого полета, рассчитанная по трехмерной мировой карте эквивалентных доз. Система *SIEVERT* в качестве базовой программы ввода данных использует *CARI* или *EPCARD* и,

следовательно, не является самостоятельным кодом. Гелиоцентрическая потенциал для системы SIEVERT рассчитывается по данным измерений французских нейтронных мониторов, расположенных в Порт-о-Франсэ (Кергеленские острова в Индийском океане) и в Дюмон-д'Юрвиль (Земля Адели в Антарктиде). Местоположение обеих станций характеризуется низкими значениями жесткости геомагнитного обреза: 15 ГВ для Кергеленских островов и от 0 до 0,05 ГВ для Земли Адели. Гелиоцентрические потенциалы вычисляются по квадратичной аппроксимации данных счета нейтронных мониторов IPEV и используемых авторами программы CARI значений гелиоцентрического потенциала за период времени — с 1964 по 1997 год. Данные со станций принимаются ежедневно с помощью спутниковой связи. В системе SIEVERT используются радиационно-весовые коэффициенты ICRP 60 [66].

В таблице 12 приведены краткие сведения о наиболее известных программах расчета доз от ГКЛ.

Таблица 12. Компьютерные коды для расчета дозы облучения членов авиаэкипажей, вследствие воздействия ГКЛ [67]

Компьютерный код	Метод	Спектр протонов ГКЛ (если имеется)	Жесткость геомагнитного обреза	Коэффициенты для пересчета дозы
AVIDOS 1.0 [69]	Мультипараметрическая модель, основанная на расчетах FLUKA по методу Монте Карло [70]	Измерения с помощью метеозонда в модификации Gaisser et al [71]	Вертикальная [72]	ICRP 60 [68] и данные Pelliccioni [73]
ERCARD.Net 5.4.0 [74]	расчеты FLUKA по методу Монте Карло [70]	Данные модели, построенной Badhwar et al. [75]	Вертикальная [76]	ICRP 60 [68] и данные Pelliccioni [73], Mares & Leuthold [77]
FDOScalc (F. Wissmann and M. Reginatto, в разработке)	Мультипараметрическое соответствие мощности амбиентного эквивалента дозы экспериментальным данным [78, 79]	—	Вертикальная [80]	—
FREE 1.3.0	Основан на аналитическом решении соответствующего уравнения Больцмана	< 10 ГэВ [81], > 10 ГэВ [82], нормализованный для 10,6 ГэВ [83]	Вертикальная [84] и невертикальная [85]	ICRP 60 [68] и данные Pelliccioni et al. [73]
PCAIRE	Полуэмпирическая модель, основанная на измерениях в сочетании с модельными весовыми коэффициентами [86-89]	—	Вертикальная [87]	ICRP 60 [68]
PLANETO-COSMICS 2.0 [80]	Моделирование нуклонно-электромагнитного каскада по методу Монте Карло на базе GEANT4	Gleeson and Axford [90], Garcia-Munoz et al. [81]	Вертикальная [76]	ICRP 60 [68] и данные Pelliccioni [73]
QARM 1.0 [91-93]	Расчет по методу Монте Карло на базе MCNPX [94]	Данные модели, построенной Badhwar et al. [75]	Вертикальная [95]	ICRP 74 [96] и данные Pelliccioni [73]
SIEVERT 1.0 [97]	Операционный код, использующий ERCARD 3.34 для создания карт мощности дозы [98]	—	—	—

Таблица 13. Коэффициенты преобразования потока для расчета AMBIENTного эквивалента дозы ($H^*(10)$) и эффективной дозы (E), используемые в программе EPCARD [9]

Частица	$H^*(10)/\Phi$ (пЗв·см ²)	E_{iso}/Φ (пЗв·см ²)
нейтроны	242	207
протоны	919	3000
заряженные пионы	799	1043
электроны	249	116
фотоны	2.70	6.02
мюоны	328	338

Таблица 14. Рекомендуемые значения взвешивающих коэффициентов излучения (ICRP 60) [99]

Вид излучения и диапазон энергий	Взвешивающий коэффициент излучения, W_R
Фотоны всех энергий	1
Электроны и мюоны всех энергий	1
Нейтроны энергия <10 кэВ	5
от 10 до 100 кэВ	10
от 100 кэВ до 2 МэВ	20
от 2 до 20 МэВ	10
более 20 МэВ	5
Протоны, кроме протонов отдачи, с энергией более 2 МэВ	5
Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра	20

Таблица 15. Рекомендуемые значения взвешивающих коэффициентов излучения (ICRP 103) [68]

Вид излучения и диапазон энергий	Взвешивающий коэффициент излучения, W_R
Фотоны всех энергий	1
Электроны и мюоны всех энергий	1
Протоны и заряженные пионы	2
Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра	20
Нейтроны	Непрерывная функция энергий нейтронов (рис. 12)

Ниже представлены результаты сличения данных различных онлайн-источников и эмпирических моделей по расчету накопленной дозы при авиаперелете. Для сличения доз отобрано 7 маршрутов: 1) Москва — Париж, 2) Новосибирск — Оттава, 3) Хабаровск — Фербранкс, 4) Рим — Сидней, 5) Бангкок — Рио-де-Жанейро, 6) Нагасаки — Ванкувер, 7) Пекин — Мадрид. Длительность перелета для каждого маршрута указана в таблице 16 и составляет от 4 до 20 часов. Каждый перелет дублируется по дате вылета, приведены расчеты для 15 января, 15 апреля, 15 июля и 15 октября (табл. 16).

Таблица 16. Результаты сличения данных различных онлайн-источников и эмпирических моделей по расчету накопленной дозы при авиаперелете по указанному маршруту

Маршрут	Общее время полета, ч	Доза, мкЗв				
		EPCARD [http://www.helmholtz-muenchen.de/epcard]	Bern University [http://kspc22.unibe.ch/NM-DB/Radiation/RadiationVsTime]	SIEVERT [http://www.sievert-system.org/]	CARI [http://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfac/aeromedical/radiobiology]	JISCARD [http://www.jiscard.jp/]
15 января						
Москва — Париж	4	18	20.5	18.4	16.7	15
Новосибирск — Оттава	11	—	77.2	117.8	58.2	—
Хабаровск — Фербранкс	5.5	—	26.8	—	25.4	—
Рим — Сидней	20.5	44	36.4	52	49.5	34.6
Бангкок — Рио-де-Жанейро	20.5	42	27.4	42	46.5	37.2
Нагасаки — Ванкувер	9.5	42	53.5	—	38.7	37.2
Пекин — Мадрид	12.5	59	61.4	92	53.8	48.8
15 апреля						
Москва — Париж	4	19	20.1	18.2	16.7	14.1
Новосибирск — Оттава	11	—	75.5	116	57.9	—
Хабаровск — Фербранкс	5.5	—	25.2	—	25.3	—
Рим-Сидней	20.5	44	35.7	52	49.5	33.2
Бангкок — Рио-де-Жанейро	20.5	43	27	42	46.5	35.9
Нагасаки — Ванкувер	9.5	43	51	—	38.6	34.1
Пекин — Мадрид	12.5	61	58.9	91	53.6	44.6

Маршрут	Общее время полета, ч	Доза, мкЗв				
		EPCARD	Bern University	SIEVERT	CARI	JISCARD
		[http://www.helmholtz-muenchen.de/epcard]	[http://kspc22.unibe.ch/NM-DB/Radiation/RadiationVsTime]	[http://www.sievert-system.org/]	[http://www.faa.gov/data_research/research/med_human_facs/aeromedical/radiobiology]	[http://www.jiscard.jp/]
15 июля						
Москва — Париж	4	19	20.3	16.9	15.9	13.8
Новосибирск — Оттава	11	—	75.4	103.5	54.1	—
Хабаровск — Фербранкс	5.5	—	27	—	23.9	—
Рим — Сидней	20.5	44	36.5	50	48.9	32.9
Бангкок — Рио-де-Жанейро	20.5	43	27.5	41	46	35.6
Нагасаки — Ванкувер	9.5	43	53.5	—	36.9	33.4
Пекин — Мадрид	12.5	60	61.5	85	51.4	43.7
15 октября						
Москва — Париж	4	18	20.3	16.9	16.4	14.7
Новосибирск — Оттава	11	—	76.1	103.4	56.6	—
Хабаровск — Фербранкс	5.5	—	27	—	24.8	—
Рим — Сидней	20.5	43	36.2	50	49.3	33.8
Бангкок — Рио-де-Жанейро	20.5	42	27.3	41	46.3	36.4
Нагасаки — Ванкувер	9.5	40	53.6	—	38	35.3
Пекин - Мадрид	12.5	57	61.3	85	52.9	46.2

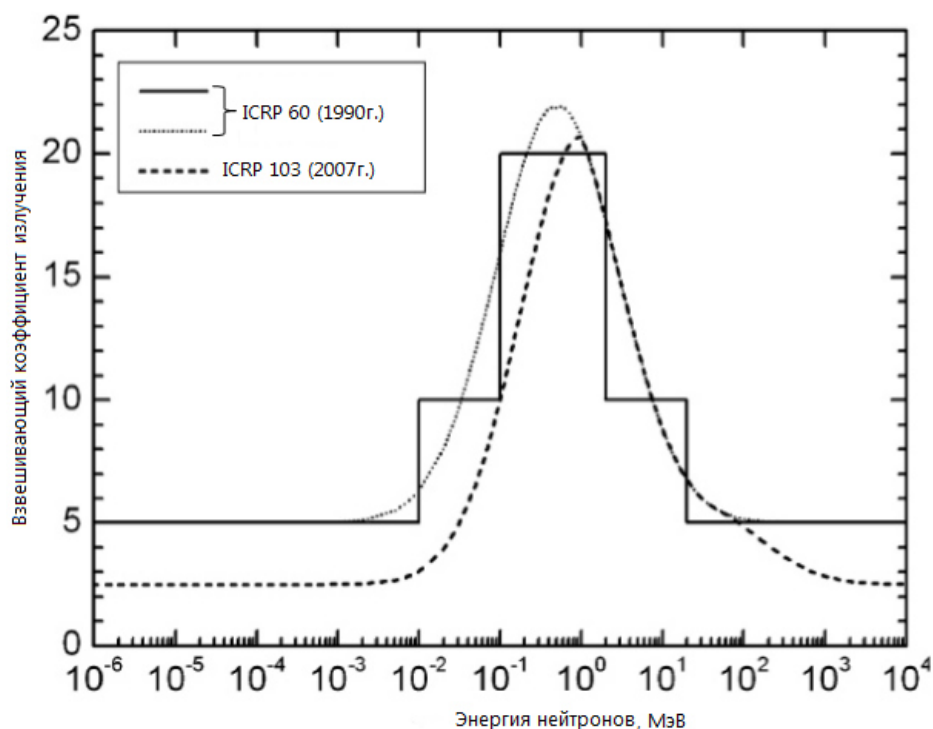


Рис. 12. Взвешивающий коэффициент излучения (W_R) нейтронов в зависимости от их энергии. Ступенчатая функция и непрерывная функция из Публикации 60 (ICRP 1991b) и функция, принятая в Рекомендациях от 2007 г. (ICRP 103) [68]

5. МЕХАНИЗМЫ ТОКСИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КЛЕТКУ И ОРГАНИЗМ

Биологическое воздействие ионизирующего излучения можно условно разделить на первичные физико-химические процессы (рис.13), возникающие в молекулах живых клеток и окружающего их субстрата, и на вторичные, т.е. нарушение функций всего организма, вследствие первичных процессов [3].

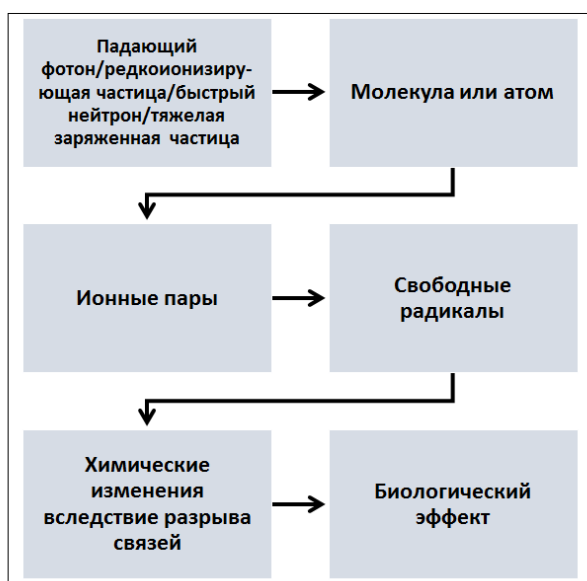


Рис. 13. Схема первичных физико-химических процессов на пути от ионизации к конечному биологическому эффекту

Поглощённая энергия от различных видов ионизирующих излучений вызывает ионизацию атомов и молекул вещества с последующим образованием свободных радикалов. Созданные частицы очень реакционноспособны и вступают по цепному механизму в различные химические реакции.

Поскольку водная среда определяет структуру и взаимодействия биологических макромолекул (содержание воды в животных клетках составляет около 70%), то процессы радиолитического распада воды играют важнейшую роль при облучении живых организмов. Образующиеся промежуточные радикалы и ионы реагируют с биомолекулами (окисление, замещение функциональных групп, деструкция, сшивка полимеров), изменяя их. Вероятность поражения тех или иных молекул определяется их размером: чем крупнее молекула, тем больше вероятность ее повреждения. Именно поэтому в качестве основной мишени радиационного поражения клетки рассматривается ДНК.

В результате прямой ионизации самой молекулы ДНК и ее атаки радикалами OH^* происходит разрыв химических связей между атомами. Разрыв связей в сахаро-фосфатном скелете нарушает непрерывность нити ДНК. Если разорвана одна из нитей, говорят об одностороннем или одностороннем разрыве. Совпадение разрывов противоположных нитей ДНК в одной точке приводит к появлению двойных (двунитевых) разрывов. При воздействии редко ионизирующего излучения в дозе 2 Зв, вызывающем гибель от 10 до 90% клеток разных тканей человека, в ДНК одной клетки образуется около 2000 односторонних и 80 двунитевых разрывов, повреждается 1000 оснований и формируется 300 сшивок с белком. Именно эти поражения и лежат в основе радиационной гибели клетки, длительного нарушения эффективности деления ее потомков и злокачественного перерождения, а в случае воздействия на половые клетки – и генетических последствий облучения родителей для потомства [102, 103].

Особенно чувствительны к действию радиации клетки в период деления и дифференцировки. Это означает, что наиболее слабым звеном в цепи биохимических процессов является синтез ДНК в интенсивно делящихся клетках. В организме человека к таким «мишеням» можно отнести клетки эпителия желудочно-кишечного тракта, кроветворные клетки, клетки иммунной системы и клетки половых органов. Наиболее опасно облучение для детей и беременных женщин.

Все биологические эффекты и последствия действия ионизирующего излучения на человека принято разделять на два класса: детерминированные и стохастические [104].

Злокачественные образования и наследственные эффекты (табл. 17) являются стохастическими (вероятностными) последствиями, теоретически они не имеют порога, и с возрастанием дозы увеличивается вероятность их возникновения, но не тяжесть поражения.

Таблица 17. Наследственные радиационные эффекты [105]

Тип генетического эффекта	Примеры
<i>Генные мутации*</i> Одиночные доминантные Рецессивные Сцепленные с полом	Полидактилия, хорей Гентигтона Серповидноклеточная анемия, ретинобластома Цветовая слепота, гемофилия
<i>Хромосомные изменения</i> Изменение числа хромосом	Синдром Дауна (трисомия, дополнительная 21-ая хромосома), гибель эмбриона
<i>Хромосомные аберрации</i>	Гибель эмбриона, умственная отсталость, физические дефекты
<i>Мульти факториальные расстройства</i> Врожденные ненормальности и уродства Хронические болезни	Неврологические дефекты (spina bifida), врожденное расщепление губы, расщепление мягкого неба Диабет, эссенциальная гипертония, коронарная болезнь сердца

Все остальные поражения (лучевая болезнь, лучевой дерматит, лучевая катаракта, лучевое бесплодие, аномалии в развитии плода и др.) имеют нестохастический, детерминированный характер. Они возникают при определенной дозе, причем с ее увеличением растут и частота и тяжесть их проявления. Эффект и последствия облучения зависят от величины поглощенной дозы, ее мощности, вида излучения, вида облучаемых тканей и органов.

Доза возникновения острой лучевой болезни составляет около 1 Зв. Если доза облучения составит от 3 до 5 Зв, то без лечения умирает 50% облученных вследствие подавления деятельности клеток костного мозга. При дозе облучения выше 10 Зв смерть наступает через 1–2 недели вследствие поражения главным образом желудочно-кишечного тракта. При дозе облучения выше 100 Зв смерть наступает

через несколько часов или дней вследствие повреждения центральной нервной системы. Таким образом, в зависимости от дозы критическими являются: центральная нервная система (>100 Зв), эпителий тонкого кишечника ($10-100$ Зв) или органы кроветворения ($2-6$ Зв). При дозах облучения менее $0,2$ Зв детерминированные эффекты не проявляются, однако повышают вероятность отдалённых последствий (стохастических эффектов).

Анализ литературы свидетельствует о том, что непосредственно действие малых доз облучения на человеческий организм слабо изучено. Например, размер выборки, необходимой для статистически надёжного определения зависимости доза-эффект в канцерогенезе (доверительная вероятность – 90%) при уровне дозы $0,1$ Зв, составляет 100 тыс. человек, а $0,01$ Зв — 10 млн. чел. [20, 106, 107].

Существует три различных точки зрения на действие ионизирующего излучения в малых дозах (рис.14).

1. Линейная беспороговая концепция (LNT — Linear Non-Threshold) постулирует линейную зависимость биологических эффектов от дозы облучения и отсутствие порога или предела, ниже которого перестают осуществляться эффекты, наблюдающиеся при больших дозах. [108]. Она принята международными организациями Научным комитетом ООН по действию атомной радиации и Международным комитетом по радиационной защите. По этой концепции биологическое действие ионизации и возбуждения атомов отмечаются при любой дозе облучения, имеет место моноклоновость большинства новообразований, и развитие опухолей может происходить при неизменённом иммунологическом и гормональном статусе организма [108]. Однако по данным многочисленных экспериментов и эпидемиологических исследований, реакция организма на «большие» дозы существенно отличается от реакции на «малые» дозы [109, 110].

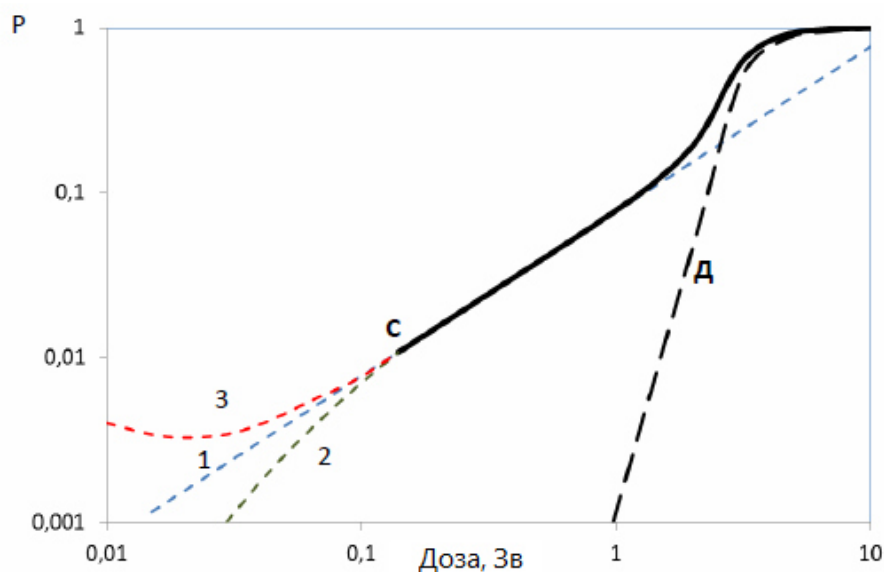


Рис. 14. Зависимость вероятности возникновения смертельных радиогенных эффектов от поглощенной дозы при равномерном облучении всего тела (сплошная линия). Пунктирные линии относятся: Д — детерминированные эффекты; С — стохастические эффекты. В области ниже $0,2$ Зв линии проведены в соответствии с гипотезами 1 — линейной беспороговой; 2 — стимулирующего действия малых доз; 3 — сверхсильного влияния малых доз

В настоящее время, исходя из линейной беспороговой гипотезы зависимости риска стохастических эффектов от дозы, приняты следующие линейные коэффициенты радиационного риска для всего населения в целом и взрослых (в скобках):

- коэффициент риска злокачественных новообразований $0,055 \text{ Зв}^{-1}$ ($0,047 \text{ Зв}^{-1}$);
- коэффициент риска наследственных заболеваний $2 \cdot 10^{-3} \text{ Зв}^{-1}$ ($1 \cdot 10^{-3} \text{ Зв}^{-1}$) [111].

2. Пороговая концепция утверждает:

- жизнь на Земле развивается в условиях постоянного действия ионизирующего излучения в «малых» дозах, при этом не был накоплен «груз», несовместимый с жизнью;

- в районах повышенного радиационного фона не выявлено изменений состояния здоровья населения по сравнению с населением, проживающим в районах со средним уровнем естественного фона. [112,113];

- наблюдается стимулирующее действие низких уровней ионизирующей радиации;

- организм не ведёт себя пассивно, первоначальные эффекты не обязательно транслируются на более высокие уровни, организм может ответить стимуляцией процессов репарации биомолекул, в том числе ДНК, повышением уровня иммунного надзора, апоптозом, регуляцией межклеточных отношений, повышением уровня клеточного обновления [114];

- по данным эпидемиологических наблюдений (в том числе за пострадавшими в г. Хиросиме и г. Нагасаки не зарегистрировано убедительных доказательств увеличения числа злокачественных новообразований и генетических нарушений у облучённых в «малых» дозах [20, 114]. Учитывая то обстоятельство, что онкологические заболевания, вызванные облучением, наступают не сразу, практически невозможно достоверно установить причину этого заболевания. За весь период наблюдений (~100 лет) не обнаружено достоверных доказательств радиогенных причин онкологических заболеваний, если доза равномерного облучения всего тела менее 200 мЗв в год.

3. Гипотеза повышенной опасности облучения в малых дозах. Согласно этой гипотезе облучение в «малых» дозах более опасно, чем в больших [114, 115, 116]. В работах, проведённые на лимфоцитах человека, указано, что у человеческого организма нет системы защиты от «малых» доз излучения, и они провоцируют самые разные заболевания, в том числе сердечно-сосудистой и нервной системы, которые обычно не связывают с прямым действием радиации. Существуют исследования, показывающие, что «малые» дозы оказывают не прямое, а потенцирующее воздействие [117–120].

Так после уточнения индивидуальных доз было установлено, что в Хиросиме тератогенный эффект радиации проявлялся уже в диапазоне доз от 0,1 до 0,2 Зв. Независимо от деталей механизма радиоэмбриологического эффекта последствия облучения эмбриона или плода таковы, что неизбежно приводят к выводу о необходимости любой ценой предотвращать лучевые воздействия в этом периоде. Пороговая доза излучения, вызывающая аномалию плода человека, пока не установлена, но облучение в дозе 0,5 Зв повышает частоту резорбции оплодотворенного яйца у мыши на очень ранней стадии. Есть основания полагать, что даже диагностические облучения беременных женщин (при дозах 0,001–0,2 Зв) могут вызвать значительные уродства, особенно если это происходит в период ранней стадии развития ЦНС (до 38-го дня после имплантации). Организм эмбриона и плода обладает крайне высокой радиочувствительностью. Облучение в этот период даже в незначительных дозах ($\leq 0,1$ Зв) вызывает тератогенные эффекты в виде различных пороков развития, задержки умственного развития и уродств (табл. 18). Облучение эмбриона даже в малых дозах в 1,5–2 раза увеличивает спонтанный уровень детского (в первые 10–15 лет жизни) рака [102].

Таблица 18. Основные отклонения от нормы, обнаруживаемые у млекопитающих (включая человека) после облучения плода

Мозг	Глаза	Скелет	Другие аномалии
Отсутствие головного мозга	Полное отсутствие-аноптальмия	Равномерное уменьшение: задержка роста, уменьшение черепа	Обратное расположение органов
Парэнцефалия	Микрофтальм	Сводчатый череп	Водянка почки
Микроцефалия	Микрокорнеа	Узкая голова	Водянка мочеточника
Мозговая Звьяга	Колобома	Черепной пузырь	Водянка яичка
Монголизм	Деформация радужной оболочки	Воронкообразная Звудь	Отсутствие почки
Уменьшение продолговатого мозга	Отсутствие хрусталика (отдельно или в сочетании с отсутствием сетчатки)	Врожденный вывих бедер	Дегенерация гонад
Атрофия головного мозга		Уменьшение и деформация хвоста	Атрофия нижних конечностей
Умственная отсталость		Чрезмерное развитие и деформация ног	Депигментация и гиперпигментация кожи
Идиотия	Открытые веки	Уменьшение пальцев	Двигательные расстройства конечностей
Нейробластома	Косоглазие		
Сужение силвиего водовода	Ретинобластома		Увеличение вероятности

Мозг	Глаза	Скелет	Другие аномалии
провода	Дальнозоркость	Пяточная стопа	возникновения лейкемии
Водянка головного мозга	Врожденная глаукома	Нарушение развития конечностей	Врожденный порог сердца
Розетки в нервной ткани	Частичный альбинизм	Синдактилия	Деформация уха
Расширение третьего и бокового желудочков мозга		Брахидактилия	Деформация лица
Уменьшение или отсутствие некоторых черепно-мозговых нервов		Нарушение одонтогенеза	Нарушение функции гипофиза
		Экзостоз большеберцовой кости	Дерматоальный миото- мальный некроз
		Изменение метафиза	
		Нарушение эмалеобразования	
		Склеротомный некроз	

6. ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ ДОЗОВЫЕ НАГРУЗКИ ПИЛОТОВ И РИСК РАЗВИТИЯ РАДИО-АССОЦИИРОВАННЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Как было отмечено в предыдущем разделе, при больших дозах облучения причиной преждевременной смерти являются детерминированные эффекты, развивающиеся в короткие сроки после облучения (лучевая болезнь). Вероятность гибели близка к единице при дозе облучения выше 1 Зв. Доза облучения в 1 Зв вызывает острую лучевую болезнь, но вероятность выздоровления уже близка к единице. В области выше 0,2 Зв наблюдается линейная корреляция между дозой облучения и вероятностью наступления онкологических заболеваний с суммарным коэффициентом 0,05 Зв⁻¹. В области доз менее 0,2 Зв нет достоверных данных о виде зависимости «доза-эффект». Поэтому МКРЗ в 1977 году предложил продлить линейную зависимость вплоть до самых малых доз, таким образом, линейная беспороговая гипотеза развития стохастических эффектов излучения была принята за основу на официальном уровне.

Безусловно, эта гипотеза удобна для разработки нормативных документов, регламентирующих дозы облучения населения. Но необходимо подчеркнуть, что в области малых доз облучения реакция организма на воздействие может быть совсем иной. Известен общебиологический принцип реагирования живого организма на раздражающий фактор: слабая стимуляция оказывает активизирующее действие, средняя — нормализующее, сильная — ингибирующее, сверхсильная — подавляющее и повреждающее. То есть малые дозы облучения могут быть не вредны, а скорее, наоборот, могут повышать защитно-приспособительные силы организма. В пользу существования стимулирующего и защитного эффектов малых доз облучения (гермезиса) свидетельствует пониженная заболеваемость лейкемией и среднее увеличение продолжительности жизни жертв атомной бомбардировки в Японии. Хотя существует и другая точка зрения. Именно сверхмалые дозы облучения, как и любые слабые воздействия, могут оказывать более сильное удельное действие ввиду того, что организм не замечает его и не включает защитные механизмы [102].

Летный состав и авиапассажиры подвергаются постоянному воздействию низких доз радиации за счет космического ионизирующего излучения. Ежегодные эффективные дозы для летного экипажа оцениваются в пределах от 2 до 5 мЗв, достигая к концу карьеры суммарной дозы в 75 мЗв. За последние 15-20 лет в этой профессиональной группе проведено значительное количество эпидемиологических исследований, как правило, направленных на выявление взаимосвязи между дозой радиации и риском развития ассоциированного рака. В большинстве субпопуляций не проводилась оценка риска возникновения рака в целом, однако был обнаружен повышенный уровень заболеваемости злокачественной меланомой, другими видами рака кожи, раком молочной железы среди членов экипажей женского пола. В некоторых исследованиях, в том числе в большой немецкой выборке, выявлен повышенный риск развития рака мозга. Вероятность смерти от сердечно-сосудистых заболеваний в когортах членов летного состава, как правило, очень низка [121].

Информация о дозах радиации для пилотов в большинстве исследований определялась не прямыми измерениями, а расчетным путем на основании информации о лицензии, типах воздушных судов, маршрутах и часах полета.

Точных моделей «доза-ответ», указывающих на риск развития онкологических заболеваний у людей с повышенными суммарными дозами вследствие воздействия космического излучения, до сих пор не найдено. В целом, члены авиа экипажей представляют высокоселективную группу населения со многими специфическими характеристиками и подверженную воздействию многочисленных факторов, которые также могут повлиять на развитие рака или изменение каких-либо показателей здоровья. В проведенных эпидемиологических исследованиях радиационно-ассоциированные последствия для здоровья до сих пор не были однозначно установлены. [121]

Первые данные когортных исследований среди персонала коммерческих авиаэкипажей были опубликованы в начале 1990-х годов — [122–126]. Результаты большинства работ указывали на низкую общую смертность пилотов, особенно вследствие сердечнососудистых заболеваний, что в первую очередь связано с изначально крепким здоровьем людей этой профессиональной группы [127].

Европейские когортные исследования авиационного персонала [128–129] были объединены в части оценки частоты заболеваемости раком и общей смертности.

В результате объединенного анализа [130], проведенного в когорте пилотов мужского пола, не выявлена зависимость между увеличением дозы радиации и смертностью по причине любого рака, а также смертности вследствие всех других причин.

В работе [131] показано, что смертность от злокачественной меланомы в когорте пилотов оказалась выше, чем в контрольной группе населения. Также выявлено увеличение частоты возникновения рака центральной нервной системы, в том числе в недавнем анализе выборки немецких членов авиаэкипажей, где проводилась взаимосвязь с продолжительностью профессиональной занятости.

Объединенные оценки заболеваемости раком простаты среди пилотов указывают на 50% увеличение риска, а в исследовании [132] риск увеличивался с ростом количества дальнемагистральных летных часов.

Согласно данным работы [133] в Германии представители авиаэкипажей с точки зрения величины эффективной дозы находятся среди профессиональных групп с наибольшим риском облучения, получая до 8,6 мЗв ежегодно, за 2007 год средняя доза составила 2,3 мЗв. При этом накопленная в течение жизни доза ионизирующего излучения остается ниже 100 мЗв [134].

В работе [135] представлены данные, полученные в результате популяционного исследования в когорте из 6000 членов авиаэкипажей немецких компаний. Собраны данные о длительности профессиональной занятости, полученных дозах ионизирующего излучения и смертности за период времени с 1960 г по 2004 г. В выборку вошли 405 случаев смерти, в том числе 127 случаев смерти от рака. В исследуемой выборке уровень смертности от всех причин и всех видов рака был значительно ниже, чем в среднем у населения Германии. В ходе регрессионного анализа показано, что общая смертность в выборке уменьшается с увеличением дозы облучения (отношение вероятностей между исследуемой и контрольной группой при 10 мЗв составило 0,85, доверительный интервал при $P=0,95$: 0,79–0,93), при этом смертность от рака, который при категориальном анализе был отнесен к нерадиогенным видам (рак легких), незначительно увеличивается (отношение вероятностей при 10 мЗв — 1,05, доверительный интервал при $P=0,95$: 0,91–1,20). Несмотря на то, что общая смертность членов экипажа от рака низка, все-таки наблюдается положительная связь между увеличением дозы облучения и риском возникновения любого вида рака.

В работе [136] показано, что при накоплении в течение 20-ти летнего карьерного срока дозы космического излучения со средней мощностью в 5 мЗв/год (всего 100 мЗв) вероятность развития радиационно-индуцированного рака составляет 0,4%, в течение 30 лет (150 мЗв) — 0,6%. В западной популяции, средняя смертность от определенных видов рака составляет до 23%, таким образом, общий риск в профессиональной когорте увеличивается с 23% до 23,4–23,6%. По сравнению со всеми другими видами профессиональных рисков, возникающих в течение жизни, это цифры весьма незначительны [137].

Результаты популяционного исследования, проведенного в 2005 году в Исландии, привели к выводу, что космические лучи повышают риск развития катаракты у пилотов коммерческих авиакомпаний: отношение вероятностей развития ядерной катаракты среди исследуемой и контрольной группы составило — 3,02 (95% доверительный интервал, 1,44–6,35) для пилотов по сравнению с «непилотами» [138].

Об опасном влиянии радиации на развитие плода говорилось в предыдущем разделе. Общеизвестным является факт радиочувствительности мозга развивающегося эмбриона, причем особенно сильное поражение возможно в период с 8 по 15 неделю. Ниже представлены экспериментальные данные по оценке мощности эквивалентной дозы для эмбриона в возрасте 8 недель,

плода в 3,6 и 9 месяцев (первый, второй и третий триместр), рассчитанные на основании данных о потоке и энергии нейтронного излучения, измеренного в 1995 году при авиаперелете по маршруту Трентон — Кельн (табл. 19) [139]. Исследование проводилось с использованием специальных фантомов эмбриона, разработанных в Бюро по радиационной защите при Министерстве здравоохранения Канады [140].

Таблица 19. Значения мощности эквивалентной дозы нейтронного излучения для плода в возрасте 8 недель, 3 месяцев, 6 месяцев и 9 месяцев, рассчитанные на основании энергетического спектра и данных флюенса ($4,24 \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$), полученных в 1995 г. при авиаперелете по маршруту Трентон — Кельн [140]

Мощность эквивалентной дозы нейтронов, мкЗв/ч					
	8 недель	3 месяца	6 месяцев	9 месяцев	Среднее
Мозг	1.54	1.97	1.96	1.28	1.69
Тело	1.57	1.61	1.45	1.31	1.49

Согласно полученным данным, мощность эквивалентной дозы для головного мозга плода в возрасте 3–6 месяцев на 40% выше, чем для всех других периодов пренатального развития. Фаза развития, соответствующая возрасту 3 месяцев (начало 13 недели) лежит в середине периода, когда мозг эмбриона наиболее радиочувствителен, поэтому в этот период беременности во избежание долгосрочных повреждений головного мозга необходимо обеспечить его максимальную защиту от воздействия космического излучения в полете.

Значимой разницы между мощностями эквивалентной дозы для всего тела зародыша на разных стадиях развития не выявлено. В среднем плод за 10 часов полета (11 км, 55° широты) вследствие действия нейтронной компоненты ГКЛ получает дозу, равную 15 мкЗв. Зная, что нейтроны в общую дозу вносят приблизительно 50%, можно предположить, что действительная доза за полет для плода будет равной 30 мкЗв. Эта величина составляет всего 3% от годового предела дозы, равного 1 мЗв.

Однако, ситуация кардинально меняется в случае, если мать часто путешествует по воздуху. Например, после 335 часов налета, вклад нейтронной компоненты в величину средней эквивалентной дозы в организме плода составит 500 мЗв ($335 \text{ ч} \cdot 1,49 \text{ мЗв}\cdot\text{ч}^{-1}$). С учетом других видов ионизирующего излучения суммарная доза, которую получает зародыш, составит $\approx 1 \text{ мЗв}$ (допустимая годовая норма). Это время полета соответствует 33 рейсам туда и обратно внутри Канады (например, Оттава — Ванкувер — Оттава), или 20 трансатлантическим перелетам (например, Торонто — Париж — Торонто). Если принять мощность эквивалентной дозы нейтронов равной $1,97 \text{ мЗв}\cdot\text{ч}^{-1}$, то в головном мозге плода трехмесячного возраста предел эффективной дозы (1 мЗв) будет превышен после ≈ 254 часов налета, или после 15 рейсов по маршруту Торонто — Париж — Торонто.

Таким образом, даже если принять во внимание вариации флюенса нейтронов в зависимости от высоты и широты, пример, приведенный в настоящем исследовании, ясно показывает, что плод может легко получить больше годового предела дозы, установленного для населения, особенно, когда мать часто путешествует на самолете или является членом летного экипажа [139].

В [141] представлены результаты ретроспективного когортного исследования 458 исландских пилотов; особое внимание уделено субкогортам, включающим персонал авиакомпаний, выполняющих международные рейсы. Стандартизированный коэффициент заболеваемости всеми видами рака был равен 0,97 (95% доверительный интервал 0,62–1,46) в общей когорте и 1,16 (95% доверительный интервал 0,70–1,81) среди тех, кто работал на международных маршрутах. Значение стандартизованного коэффициента заболеваемости злокачественной меланомой кожи составило 10,20 (95% доверительный интервал 3,29–23,81) в общей когорте и 15,63 (95% доверительный интервал 5,04–36,46) в группе пилотов, летавших на международных рейсах. Анализ групп выявил прямую зависимость между числом летных часов, полученной дозой облучения и частотой возникновения злокачественной меланомы — стандартизованные коэффициенты заболеваемости в подгруппах с высокими значениями оцениваемых параметров оказались равными 13,04 и 28,57 соответственно. Открытым для обсуждения остается вопрос этиологии этого заболевания, причиной может быть как подверженность влиянию космического излучения, так и факторы образа жизни, например, чрезмерный прием солнечных ванн. Кроме того, повышенная заболеваемость меланомой наблюдалась среди тех пилотов, кто совершал перелеты с пересечением пяти часовых поясов — стандартизированный коэффициент заболеваемости злокачественной меланомой равен 25,00, что говорит о важности такого фактора, как нарушение циркадианного ритма, который также должен быть принят во внимание.

Известно, что наличие хромосомных транслокаций является эффективным биомаркером кумулятивного воздействия внешнего ионизирующего излучения. Пилоты гражданской авиации в силу своей профессии чаще остальных групп населения подвергаются воздействию космического ионизирующего излучения, но исследования хромосомных транслокаций в корреляции с количеством летных часов у этой когорты остаются малоизученными. В работе [142] представлены результаты по оценке частоты появления транслокаций в хромосомах лимфоцитов периферической крови 83 пилотов (средний возраст 47 лет), контроль — группа из 50 мужчин в возрасте 46-ти лет. Методом флуоресцентной гибридизации *in-situ* (FISH) у каждого субъекта исследования в среднем изучены 1039 клеточных эквивалента (КЭ), число обнаруженных хромосомных транслокаций выражено в пересчете на 100 КЭ. Для оценки взаимосвязи между частотой транслокаций и накопленной дозой, количеством летных часов использовали обратные регрессионные модели, с поправкой на возраст, количество проведенных диагностических процедур (рентген) и наличия опыта военных полетов. Между контрольной и тестируемой группой не выявлено значительной разницы в средней частоте хромосомных транслокаций — $0,37 \pm 0,04$ против $0,38 \pm 0,06$ в пересчете на 100 КЭ для пилотов и «непилотов», соответственно. Тем не менее, анализ, проведенный среди групп пилотов с различным количеством летных часов, показал увеличение частоты возникновения транслокаций с ростом числа часов, проведенных в воздухе, с соотношением оценок 1,06 (95% доверительный интервал 1,01–1,11) и 1,81 (95% доверительный интервал 1,16–2,82) для групп пилотов с 1-им и 10-ти летним летным стажем, соответственно. Таким образом результаты исследования [142] показывают, что пилоты с долгосрочным опытом работы могут быть подвержены биологически значимым дозам ионизирующего излучения. Однако для выявления однозначной взаимосвязи между дозой космического излучения и риском развития рака по-прежнему необходимы эпидемиологические исследования с достаточно длительным периодом наблюдения больших когорт пилотов с широким диапазоном уровней воздействия радиационного излучения [142].

7. ГОСУДАРСТВЕННЫЕ МЕХАНИЗМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК ВСЛЕДСТВИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Международная Комиссия по радиологической защите (МКРЗ) анализирует и обобщает все достижения в области защиты от ионизирующих излучений и периодически разрабатывает соответствующие рекомендации, исходя из научных принципов.

Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) разрабатывает рекомендательную нормативную документацию по работе с радиоактивными веществами и ионизирующими излучениями и предлагает свои рекомендации организациям по нормированию и научному сопровождению в качестве помощи в руководстве и реализации мер радиационной защиты, а также нормы облучения для персонала и населения. Нормы по ядерной безопасности (Nuclear Safety Standards — NUSS) носят рекомендательный характер, поскольку Агентство не вправе навязывать то, что находится в ведении национальных органов. Тем не менее, национальные нормы большинства стран мира, в том числе, Российской Федерации, содержат предписания, эквивалентные нормам NUSS (табл.20).

Таблица 20. Основные пределы доз согласно нормам NUSS

Нормируемые величины	Пределы доз	
	Персонал (группа А)	Население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв/год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год в:		
хрусталике глаза	150 мЗв	15 мЗв
коже	500 мЗв	50 мЗв
кистях и стопах	500 мЗв	50 мЗв

В Российской Федерации национальная система регулирования радиационной защиты и обеспечения радиационной безопасности опирается на три основных документа: ФЗ N 3 от 09.01.1996 (ред. от 19.07.2011) "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 в NUSS. Однако допустимое значение эффективной дозы, обусловленной суммарным воздействием природных источников излучения (табл. 21), для населения не устанавливается. Так ФЗ «О радиационной безопасности населения» гласит: «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).

Таблица 21. Оценка эквивалентной годовой дозы, получаемой человеком, мЗв [143]

Источник	Среднемировая доза	Типичный диапазон
Космическое излучение	0,38	0,3-1
Гамма-излучение Земли	0,48	0,3-0,6
Ингаляции (^{222}Rn , ^{220}Rn и продукты их распада)	1,3	0,2-10
Внутреннее облучение	0,24	0,2-0,8
Все природные источники	2,4	1-12,4
Медицинское облучение	0,4	0-1,6
Глобальные выпадения	0,005	
Профессиональное облучение	0,0005	
Загрязнение территорией	0,002	
Все искусственные источники	0,4	0-1,6
Всего	2,8	1-14

Тот факт, что эффективная доза от естественного фона в глобальных масштабах варьирует примерно в 10 раз и более, поддерживает точку зрения, согласно которой озабоченность должна быть повышенной, начиная с верхней границы природного фона.

Ниже приведены уровни озабоченности опасностью облучения при разных индивидуальных эффективных годовых дозах (табл. 22).

Таблица 22. Уровни озабоченности опасностью облучения при разных индивидуальных эффективных дозах

Уровень озабоченности	Индивидуальная эффективная доза за год
Высокий	Более 100 мЗв
Повышенный	Более нескольких десятков мЗв
Низкий	1–10 мЗв
Очень низкий	Менее 1 мЗв
Нет озабоченности опасностью облучения	Менее 0,01 мЗв

Таблица 23. Среднегодовые дозы облучения для различных категорий профессий [144, 145]

Вид профессиональной деятельности	Среднегодовые дозы, мЗв	
	Великобритания	Канада
Рабочий в помещениях, подверженных выходу радона	5,3	-
Горнорабочий по добыче урана	3,5	2
Пилот воздушного судна	2	4,6
Промышленный рентгенолог	0,7	2,8
Работник предприятия ядерной промышленности	0,7	4,7
Врач ядерной диагностики	—	1,4
Работник промышленного предприятия	0,5	—

Из предыдущих разделов данного обзора следует, что, вне зависимости от маршрута, перемещения по воздуху всегда приводят к увеличению годовой дозы облучения человека, и для лиц, регулярно совершающих длительные перелеты, суммарная годовая доза будет существенно выше. Среднегодовая доза радиационного облучения членов экипажей воздушных судов сравнима или даже превышает дозы,

получаемые другими группами лиц, имеющими профессиональный контакт с источниками радиации (табл. 23).

Вследствие этого Международным комитетом по радиационной защите в публикации 60 (ICRP, 1991b) было рекомендовано, считать воздействие космического излучения частью профессионального облучения при эксплуатации коммерческих реактивных самолетов и при космических полетах. В последующих публикациях - ICRP 75 - МКРЗ представил дополнительные разъяснения, указав, что в целях контроля нет необходимости рассматривать облучение часто летающих пассажиров, как профессиональное облучение. 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 [146].

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

8. СТРАТЕГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОПРОТЕКТОРОВ И АДАПТОГЕНОВ ДЛЯ ПРОФИЛАКТИКИ ПОСЛЕДСТВИЙ ОБЛУЧЕНИЯ АВИАПАССАЖИРОВ ВТОРИЧНЫМИ КОСМИЧЕСКИМИ ЛУЧАМИ

Несмотря на обширные исследования, радиобиологи не достигли единого, полного и общепризнанного представления о механизме действия химических радиопротекторов, что отчасти является следствием ограниченности современных познаний о развитии радиационного поражения при поглощении энергии ионизирующего излучения живыми организмами. Существует две теории радиопротекторного механизма действия.

Радиохимическая теория говорит о том, что радиозащитные вещества либо их метаболиты непосредственно вмешиваются в первичные пострadiационные радиохимические реакции. Например:

— химическая модификация биологически чувствительных молекул-мишеней за счет создания смешанных дисульфидов между SH-группой аминокислоты белковой молекулы и SH-группой протектора;

— передача атома водорода от молекулы протектора пораженной молекуле-мишени;

— инактивация окислительных радикалов, возникающих преимущественно при взаимодействии ионизирующего излучения с водой пораженной ткани.

Биохимико-физиологическая теория объясняет действие радиозащитных веществ их влиянием на клеточный и тканевый метаболизм. Не участвуя в самой защите, радиопротекторы косвенно способствуют созданию состояния повышенной радиорезистентности, мобилизуя собственные резервы организма. Вещества, относящиеся к этой группе, имеют следующие механизмы действия:

— увеличение радиоустойчивости под влиянием радиопротекторов сопровождается увеличением содержания в организме эндогенных сульфгидрильных групп (Сульфгидрильная гипотеза). Это происходит не только при применении протекторов, содержащих сульфгидрильные группы, но и при введении индолилалкиламинов, а также при создании газовой гипоксии.

— взаимодействие протектора с группами ферментов в митохондриях и эндоплазматическом ретикулеуме или с белками клеточных мембран коррелирует с ингибированием метаболических реакций, нарушениями проницаемости эндоплазматических мембран, что в свою очередь снижает общее потреб-

ление кислорода клетками. Комплекс этих изменений назвали «биохимическим шоком». Радиопротекторы способны переводить в состояние повышенной радиоустойчивости различные биохимические системы: синтез ДНК, ядерное фосфорилирование и окислительное фосфорилирование.

— влияние на центральную нервную систему, систему гипофиз-надпочечники, на сердечно-сосудистую систему с созданием общей или избирательной тканевой гипоксии. Снижение доступа кислорода из крови в клетку приводит к уменьшению уровня активных форм кислорода.

Исторически большинство лекарственных препаратов-радиопротекторов разрабатывалось с целью снижения смертности личного состава войск при применении ядерного оружия или для защиты космонавтов от космических лучей в случае накопленной дозы свыше 0,5 Зв. Практическая задача увеличения терапевтического индекса и одновременного уменьшения проявлений побочных эффектов стала определяющей при выборе лекарственных веществ из двух основных групп: индоллилалкиламинов (Триптамин, Серотонин, Мексамин) и меркаптоалкиламинов - серосодержащих соединений, имеющих структуру $RN(CH_2)_nSR$ (Цистамин, Амифостин, МПГ).

Механизмы действия индоллилалкиламинов связывают с сосудосуживающим эффектом и развитием тканевой гипоксии, а меркаптоалкиламинов преимущественно с клеточно-концентрационным механизмом развития «биохимического шока», реализуемым непосредственно в клетках критических систем.

Лекарственные препараты данных групп отличаются высокой токсичностью. Так, наиболее распространённые (>5%) побочные эффекты одного из самых «безопасных» радиопротекторов — Цистамина — рвота (35%), анорексия (31%), лихорадка (22%), диарея (16%), вялость (11%) и сыпь (7%).

Несмотря на 60-летний поиск средств химической защиты человека от радиации, полностью удовлетворительного результата достигнуто не было. Разработанные радиопротекторы, помимо ряда побочных эффектов, имеют, как правило, ограниченный диапазон применения и не способны устранять последствия воздействий в диапазоне малых (до 100 мГр) и средних (до 1 Гр) доз облучения [88]. Активные радиопротекторные свойства всегда сопряжены со значительной долей побочных явлений в популяции.

В отечественном справочнике «РЛС» — регистр лекарственных средств — выделяют фармакологическую группу «Детоксицирующие средства, включая антидоты», куда относят три ЛП с радиопротекторной активностью: Пентацин, Цистамин, Этиол (табл. 24).

Таблица 24. Лекарственные средства с радиопротекторными свойствами (по данным справочника «РЛС»)

Торговое название ЛП	Действующее вещество	Лекарственная форма	Производитель, страна
Пентацин®	Кальция тринатрия пентетат	р-р для инъекций	Фармзащита НПЦ (Россия)
Цистамин®	Цистамин	таблетки	Фармакон ОАО, Дальхимфарм ОАО (Россия)
Этиол®	Амифостин	лиофилизат для приготовления р-ра для инфузий	MedImmune Pharma (Нидерланды)

В Государственный реестр лекарственных средств Российской Федерации (ГРЛС РФ) в данный момент включен лишь один ЛП-радиопротектор — Пентацин, р-р 5% для инъекций в ампулах. Его радиопротекторные свойства основаны на способности связывать и выводить из организма радионуклиды.

Среди показаний к применению Пентацина выделяют: острые и хронические отравления плутонием, радиоактивными натрием, цезием, цинком, свинцом и смесью продуктов деления урана.

Очевидно, что применять подобную стратегию оперативной защиты от радиационного поражения для авиапассажиров, дозовые нагрузки для которых на порядки меньше, бессмысленно [89-102]. Основные эффекты от воздействия вторичных космических лучей состоят лишь в увеличении риска отдаленных стохастических последствий — рака и генетических нарушений, а также снижении неспецифической резистентности организма. Такие последствия наиболее опасны для внутриутробного развития, здоровья детей, пожилых людей, пассажиров, имеющих в анамнезе хронические заболевания.

Основываясь на результатах обзора научных статей, а также анализа справочной литературы («РЛС») и нормативной документации (ГРЛС РФ), мы сделали заключение о том, что на фармацевтическом рынке РФ пока нет специализированного лекарственного средства из группы «Радиопротекторы», который можно было бы предложить населению в качестве эффективного и безопасного средства профилактики отдаленных последствий воздействия низких доз ионизирующего излучения.

Обзор научной периодики также показал [89–102], что радиопротекторными свойствами обладают не только ЛС разных фармакологических групп (витамины, блокаторы кальциевых каналов, гормоны и др.), но и гомеопатические препараты, минеральные воды, компоненты бактериальных клеток (пептидогликаны), препараты из лекарственного растительного сырья. Однако до сих пор не существует единой классификации радиопротекторных ЛС.

В настоящее время ученые продолжают поиск новых радиопротекторных ЛП. В ряде экспериментальных работ доказана радиопротекторная активность препаратов, применяющихся для терапии других нозологий.

Так, например, Нифедипин является блокатором кальциевых каналов (БКК) и широко используется в качестве антигипертензивного средства. Но поскольку после повреждения клетки свободными радикалами, поступление кальция в клетку стимулирует ее гибель, ученые выдвинули гипотезу о возможности применения препарата в качестве противолучевого средства. Радиопротекторное действие доказано экспериментально: за 30 минут до облучения мышам был дан нифедипин в количестве 4 ммоль/кг, в результате чего выживаемость особей на 30 сутки составила 100% в отличие от контрольной группы, выживаемость которой составила лишь 61% [103]. Затем дозу нифедипина увеличили до 9 ммоль/кг и дали мышам за 3 часа до облучения, при этом выживаемость составила 83%. [104,105]

Другой пример — 5-Андростендиол — стероидный гормон, в высоких дозах способен увеличивать мышечную массу. Механизм радиопротекторного действия связывают с иммуномодулирующим действием препарата: стимулирует выработку лейкоцитов и тромбоцитов [106]. Способность препарата восстанавливать кроветворение в облученном организме представляет существенный фактор в выживаемости летально облученных животных [107–110].

Мелатонин является основным гормоном эпифиза, регулятором суточных ритмов. В настоящее время недостаточно раскрыты вопросы, касающиеся оптимизации схемы использования мелатонина при экстремальных воздействиях на организм облучения, а также недостаточно изучен вопрос о механизмах его генопротективного эффекта. Однако в исследовании [111] изучалось влияние мелатонина на кластогенез радиационной этиологии и исследовался механизма его генопротективного действия. Эксперименты проводили на белых нелинейных крысах. В качестве источника ионизирующего излучения использовали установку для облучения животных «Игур-1» с изотопом ^{137}Cs . Животных подвергали внешнему острому однократному общему γ -облучению в дозах 2 или 4 Гр, мощность дозы 1 Гр/мин. Мелатонин вводили интраперитонеально за 30 мин до облучения. В результате облучения отмечалось выраженное повреждение генетического аппарата активно пролиферирующих клеток костного мозга крыс. Уровень хромосомных aberrаций возрастал в 9–10 раз. Мелатонин в дозе 10 мг/кг в условиях профилактического введения уменьшал до 8 % выраженность постлучевых нарушений в хромосомах у крыс, облученных в дозе 2 Гр. При увеличении дозы облучения до 4 Гр этой дозы препарата оказалось недостаточно. Однако с увеличением дозы мелатонина до 50 мг/кг уровень хромосомных aberrаций снижался до 6,5 %. Анализ типов повреждений хромосом показал, что рост уровня aberrаций происходил преимущественно за счет спектра нестабильных aberrаций. Под влиянием мелатонина в исследуемых дозах снижалось число фрагментов, а также дицентрических хромосом и полиплоидов.

С целью уточнения механизмов цитопротекторного действия мелатонина изучено его влияние на процессы свободно-радикального окисления липидов как маркера выраженности оксидативного стресса, а также на параметры системы антиоксидантной защиты. После облучения в дозе 4 Гр у экспериментальных животных наблюдалось увеличение интенсивности свободно-радикального окисления и активности антиоксидантной системы (на 12–13 %). При этом отмечалось увеличение уровня общей оксидантной активности и снижение общей антиоксидантной активности. Мелатонин, введенный за 30 мин до облучения, снижал интенсивность процессов свободно-радикального окисления и усиливал общую антиоксидантную активность, что свидетельствует о предотвращении или ослаблении развития в организме оксидативного стресса.

Таким образом, полученные в работе [111] данные свидетельствуют о перспективности изучения синтетического аналога эпифизарного гормона мелатонина в качестве средства профилактики развития неблагоприятных цитогенетических последствий воздействия на организм факторов радиационной этиологии.

Приведенные результаты экспериментов лишь малая часть той исследовательской работы, которая проводится учеными в поисках новых эффективных радиопротекторов. Для реализации радиопротекторных свойств такие препараты должны обладать антиоксидантной или иммуномодулирующей активностью, или оказывать неспецифическое действие по усилению резистентности организма к неблагоприятным факторам окружающей среды. Так в практике дополнительных средств защиты космонавтов

применяют препараты, содержащие селен, витамин Е, цинк, медь, железо, марганец, ЛП из лекарственного растительного сырья.

В качестве безопасных средств для широкого применения в рамках безрецептурного отпуска можно рекомендовать следующие ЛС:

- витамины А, В, С, Е;
- поливитаминные и минеральные комплексы;
- минеральные воды в качестве источников микроэлементов;
- лекарственные средства с антиоксидантными свойствами на основе лекарственного растительного сырья, содержащего флавоноиды [89–102].

С учетом современных данных о свойствах и составе воды, интересным объектом научных исследований при разработке новых радиопротекторов является легкая вода — вода с пониженным содержанием одного из изотопов водорода — дейтерия.

Защитные возможности легкой воды определяются особенностями взаимодействия нейтронов с ее молекулами и атомами, в частности с атомами протия (^1H), содержание которых в легкой воде выше, чем в обычной.

На сегодняшний день легкую воду можно рассматривать как *наиболее безопасное и доступное* средство для снижения рисков заболеваний целевых групп населения от облучения естественными источниками. Так воду с пониженным содержанием дейтерия в качестве профилактического средства можно предложить пассажирам при совершении авиаперелета.

Спектр действия легкой воды очень широк. Актуальными являются научно доказанные радиопротекторные свойства легкой воды, которые впервые обнаружены Варнавским И.Н. в экспериментах на *Drosophila melanogaster* [139]. Позднее, в 1999 году, радиопротекторное действие легкой воды было зарегистрировано при проведении экспериментов на группе мышей, облученных кобальтовой пушкой в летальных дозах (8,5 Гр) [140].

Результаты исследований [141] свидетельствуют о значительном снижении выхода новообразований различных локализаций у крыс после ежедневного гамма-облучения ^{60}Co в низкой дозе (0,25; 0,50; 1,0 Гр) на фоне приема воды с пониженным содержанием дейтерия.

Как показали исследования лаборатории мембранологии Научного центра здоровья детей РАМН, в легкой воде до 30% вырастает уровень АТФ в клетках. При этом клетки более активно сопротивляются воздействию на них различных ядов. Так, при действии на клетку химических веществ, подавляющих дыхание клеток, выживаемость клеток в легкой воде через час оказывается в 2 раза выше, чем в бидистилляте.

Результаты изучения структуры иммунных органов (тимуса и селезенки) свидетельствуют о том, что механизмы адаптивного эффекта воды с пониженным содержанием дейтерия обусловлены повышением общей резистентности организма экспериментальных животных.

Результаты исследований частоты помутнений хрусталика у облученных в дозе 1,0 Гр и интактных животных показали, наличие положительного эффекта при использовании воды с пониженным содержанием дейтерия, где четко прослеживалась задержка образования помутнений хрусталика и созревания катаракты [141].

Проведенные исследования открывают перспективы модификации отдаленных эффектов ионизирующей радиации при использовании воды с пониженным содержанием дейтерия.

Мы предлагаем использовать легкую воду в качестве средства профилактики отдаленных последствий воздействия ИИ на организм человека, в зависимости от дозовой нагрузки.

Поскольку точный расчет полученной дозовой нагрузки представляет сложности, для оценки полученной авиапассажирами общей дозы ИИ можно использовать сервисы космической погоды (<http://space-weather.ru/spaceweather/>), где в зависимости от потока солнечных энергичных протонов выделяют несколько уровней опасности — «зеленый», «желтый» и «красный» — и соответствующих им биологических эффектов (табл. 25).

Можно предложить следующее использование легкой воды в зависимости от показаний потока энергичных протонов, а, следовательно, и величины полученной дозы ИИ:

1. Вода талая гренландская с содержанием дейтерия 120 ppm — показана при воздействии умеренных и слабых солнечных протонных событий;
2. Вода антарктическая (*Aqua SLAP*) с содержанием дейтерия 90 ppm — при воздействии очень сильных и сильных солнечных протонных событий;
3. Вода суперлегкая — содержание дейтерия менее 5 ppm — показана при воздействии экстремальных солнечных протонных событий, но только для взрослых без хронических заболеваний.

Предлагается представить данные выше рекомендации по профилактическому применению легкой воды в виде таблицы (табл. 26), удобной для использования широкими слоями населения.

Таблица 25. Возможные последствия возмущений космической погоды по шкале NOAA [<http://www.swpc.noaa.gov/NOAAscales/>]

Солнечные протонные события и возможные биологические эффекты			Поток протонов с энергией >10 МэВ
S5	Экстремальное	Биологический эффект: неизбежно высокий уровень радиационной опасности для космонавтов, находящихся в открытом космосе; высокий уровень радиационной опасности для экипажей пассажиров самолетов в высоких широтах.	10^5
S4	Очень сильное	Биологический эффект: высокий уровень радиационной опасности для космонавтов, находящихся в открытом космосе; значительный уровень радиационной опасности для экипажей и пассажиров самолетов в высоких широтах.	10^4
S3	Сильное	Биологический эффект: небольшой уровень радиационной опасности для космонавтов, находящихся в открытом космосе и для экипажей и пассажиров самолетов в высоких широтах.	10^3
S2	Умеренное	Биологический эффект: нет.	10^2
S1	Слабое	Биологический эффект: нет.	10

Таблица 26. Практические рекомендации по применению легкой воды в качестве радиопротекторного средства в зависимости от уровня опасности согласно данным о потоке протонов с энергией >10 МэВ

Вода	Содержание дейтерия, ppm	Уровень опасности согласно данным о потоке протонов с энергией >10 МэВ
Вода талая гренландская	120	Зеленый
Вода антарктическая (<i>Aqua SLAP</i>)	90	Желтый
Вода суперлегкая	<5	Красный

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В большинстве развитых зарубежных стран дозы облучения экипажей воздушных судов гражданской авиации, обусловленные их профессиональной деятельностью, достаточно строго контролируются и постоянно анализируются на протяжении более чем 20 последних лет. В научной литературе имеются данные о результатах контроля уровней облучения членов экипажей самолетов авиакомпаний Германии; средние дозы их облучения составляют 1,3–2,5 мЗв/год, а максимальные дозы не превышают 6 мЗв/год. Примерно такие же уровни облучения характерны для экипажей воздушных судов гражданской авиации Нидерландов, Великобритании и ряда других стран Евросоюза. Несколько более высокие дозы облучения, достигающие в среднем 5 мЗв/год характерны для экипажей воздушных судов гражданской авиации США.

Систематические сведения о результатах контроля доз облучения пассажиров и экипажей воздушных судов гражданской авиации в российских авиакомпаниях, а также о реальных дозах их облучения в научной литературе отсутствуют. В связи с этим получение таких данных представляет определенный научный и практический интерес. В частности, такие сведения важны в аспекте понимания вклада этого источника облучения в суммарные дозы облучения населения Российской Федерации.

Из анализа сведений из зарубежной научной литературы следует, что облучение экипажей современных воздушных судов гражданской авиации при полетах на высоте до 12 км не представляет серьезной угрозы их здоровью, однако радиационный фактор, как и любой потенциально вредный фактор производственной среды, требует контроля и, при необходимости, принятия мер по ограничению его воздействия до уровней, не превышающих нормативные.

Пути решения данной проблемы в целом понятны, для этого нужна система прогноза, контроля и ограничений доз облучения экипажей, включая выбор маршрутов полета, оптимизацию направлений для отдельных членов экипажей воздушных судов гражданской авиации и т.д. Для организации кон-

троля за дозами облучения экипажей воздушных судов гражданской авиации и оценки доз облучения авиапассажиров должна быть разработана специальная система получения, сбора и хранения этих данных. Методология определения эффективных доз облучения экипажей воздушных судов гражданской авиации должна опираться на результаты инструментальных измерений и учитывать маршруты следования воздушных судов, высоту и продолжительность полетов, состояние солнечной активности, вклад различных компонентов космического излучения в эффективные дозы экипажей и пассажиров и т.д.

Анализ обширного числа научных работ по исследованию эффективности и безопасности радиопротекторных лекарственных средств показал, что активные радиопротекторные свойства ЛС всегда сопряжены со значительной долей побочных явлений в популяции. Разработанные радиопротекторы, помимо побочных эффектов, имеют, как правило, ограниченный диапазон применения и не способны устранять последствия воздействий в диапазоне малых (до 100 мЗв) и средних (до 1000 мЗв) доз облучения. Анализ справочной литературы (РЛС) и нормативной документации (ГРЛС РФ) показал, что на фармацевтическом рынке РФ нет специализированного лекарственного средства из фармакологической группы «Детоксицирующие средства, включая антидоты», который можно было бы предложить населению в качестве эффективного и безопасного средства профилактики отдаленных последствий воздействия **низких доз** ионизирующего излучения.

Разработаны практические рекомендации по применению воды с низким содержанием дейтерия в качестве наиболее безопасного радиопротекторного средства. Во взаимно-однозначную корреляцию со степенью очистки воды от дейтерия ставятся значения полученной дозовой нагрузки, согласно данным сервиса космической погоды (www.space-weather.ru).

DOSIMETRY FOR PASSENGER AIR SERVICE

M.A. Morozova, V.B. Lapshin, S.V. Dorensky, A.V. Syroeshkin

When flying on commercial aircraft, man rises to a height of 13 kilometers, losing the protecting shield of the Earth's atmosphere, what leads to a substantial increase in additional exposure. Radiation exposure during air travel may exceed background Earth level in 100 times depending on the route. At an altitude of 10 km baseline values may exceed 300 $\mu\text{R/h}$ (3 $\mu\text{Sv/h}$), which is more than in the Chernobyl zone (70 $\mu\text{R/h}$) and is comparable to the level of radiation in the vicinity of the Fukushima (250 $\mu\text{R/h}$) [1]. The most dangerous are long flights over the polar regions. When solar flares are accompanied by solar proton events the dose rate due to secondary cosmic rays may exceed background in 100 000 times [2].

This overview comprehensively highlights the problem of dosimetry in air transportation, since the question of doses evaluation, radiation environment forecast, finishing out the state regulatory mechanisms of radiation safety of air travel, as well as the strategies for the use of adaptogens and radioprotectors. Much attention is paid to the description of the primary cosmic radiation and the processes of formation of secondary cosmic rays, which are the main radiation factor affecting the aircrew and passengers. A separate section is devoted to the methods of detection of electromagnetic radiation and corpuscular streams - classification of devices, description of the principles of operation, the main operating parameters, including measurement range. The review provides some results from leading European and American research groups devoted to the measurement of effective doses on various routes in the middle and high latitudes at different levels of solar activity. The questions of radiotoxicology are also described including the mechanisms of toxic effects of various types of ionizing radiation at the cellular and organism levels, the relationship between dose and effect; there is also information about population studies in cohorts of crew members at commercial airlines.

KEYWORDS: DOSIMETRY, FLIGHTS, SECONDARY COSMIC RAYS, RADIOTOXICOLOGY.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://new.atmc.jp/>
2. <http://radiation.domachevo.com/avia.htm>
3. Радиация. Дозы, эффекты, риск: Пер. с англ. — М.: Мир, 1990. — 79 с., ил.
4. Лаврухина А.К., Алексеев В.А., Горин В.Д., Ивлиев А. В. Низкофоновая радиометрия. — М.: Наука, 1992. — 259 с.
5. 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 — <http://cordis.europa.eu/documents/documentlibrary/75331981EN6.pdf>
6. Крисюк Э.М. Радиационный фон помещений. — М.: Энергоатомиздат, 1989.— 120 с.
7. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1995. — 494 с.

8. Ерхов, В. И. Контроль уровней ионизирующего излучения в нижних слоях атмосферы: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 04.00.22 / В. И. Ерхов. — Москва, 1994. — 17 с.
9. Radiation protection 140. Cosmic radiation exposure of aircraft crew final report EURADOS WG 5 to the Group of Experts established under Article 31 of the Euratom treaty. 2004. 271 P.
http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/doc/publication/140.pdf
10. O'Sullivan D. Exposure to galactic cosmic radiation and solar energetic particles // Radiation protection dosimetry. — 2007. V. 125. No. 1–4. P. 407–411.
11. Буров В.А. Авиаперевозки и космическая погода // Гелиогеофизические исследования. 2013. №5. С. 43–52.
12. Polar Route Operations, Aero, 16, Boeing, http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/aero_16/polar_story.html
13. Hok K. Ng. Cross-polar aircraft trajectory optimization and the potential climate impact // 30th Digital Avionics Systems Conference, October 16–20, 2011
http://www.aviationsystemsdivision.arc.nasa.gov/publications/2011/DASC2011_Ng.pdf
14. Агулова Л.П. Принципы адаптации биологических систем к космогеофизическим факторам. // Биофизика. — 1998. Т.43. вып.4 С.571–574.
15. Шестопалов И.П., Колесов Г.Я., Петров В.М. и др. Вспышки СКЛ и межпланетные потоки солнечного ветра. // Космические исследования. 1992. Т.30. N 4. 547 С.
16. Beth H.A., Korf S.A. Plachek G. In the Interpretation of Neutron Measurements in Cosmic Radiation // Phys. Rev. — 1940. V.57. P. 573–587.
17. Bulgara L. F. Magnetic field, plasmas, and coronal holes: the inner solar system // Spase Sci. Rev. 1979. V.23. №2. P.201.
18. Хргиан А. Х. Физика атмосферы // Гидрометеорологическое издательство. — Ленинград, 1969. С.113-114.
19. Стожков Ю.И. Космические лучи в атмосфере Земли. <http://nature.web.ru/db/msg.html?mid=1158223>
20. Сыроешкин А.В. Нейтронное поле Земли и биосфера. - Saarbrucken, Germany: Palmarium Academic Publishing, 2012. 236 p.
21. Schraube, H., Heinrich, W., Leuthold, G., Roesler, S., and Schraube, G. Collating of data for the determination of the exposure of aviation personnel due to cosmic radiation, concluded by 21 Dec 2000, and Calculation of radiation fields at air craft flight altitude during the period of solar maximum activity by 15 Nov 2000. Joint Report to the Council of the Dublin Institute for Advanced Studies (DIAS) 2002.
22. Schraube, H., Heinrich, W., Leuthold, G., Mares, V. and Roesler, S. Aviation Route Dose Calculation and its Numerical Basis. Tenth International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA-10), Hiroshima, Japan, T-4-4 2000. <http://www.irpa.net/irpa10/cdrom/01230.pdf>
23. O'Sullivan, D. Study of Radiation Fields and Dosimetry at Aviation Altitudes. Final Report, January 1996 – June 1999. Contract Number: F14P-CT950011 DIAS Report 99-9-1 (1999). DOS99.
24. С.А. Данько, С.С. Кингсеп, О.В. Тельковская, А.Г. Алексеев, Г.И. Бритвич Активационный детектор нейтронов для импульсной реакции D-D-синтеза / Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2012. вып.1. С. 23–30.
25. Тимошенко Г.Н. Методы экспериментальной ядерной физики. Дубна: международный университет природы, общества и человека «Дубна». 178 С. http://trb.jinr.ru/kafedra/html/for_students/files/met_yad_fiz.pdf
26. http://profbeckman.narod.ru/radiometr.files/L1_1_3.pdf
27. http://profbeckman.narod.ru/radiometr.files/L1_1_4.pdf
28. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/detectors/scint.htm>
29. Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, Э.И. Кэбин. "Частицы и ядра. Эксперимент", М.: Издательство МАКС Пресс, 2013.
30. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/detectors/calorim/index.html>
31. <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/080/928.htm>
32. Каляев Б.Е., Шуршаков В.А., Лягушин В.И., Методика определения вклада нейтронов в дозу облучения космонавтов, основанная на термолюминесцентных и бабл-детекторах.// Научная сессия МИФИ. — 2005. Т.5. С.205-206.
33. http://chemanalytica.com/book/novyvy_spravochnik_khimiya_i_tekhnologa/11_radioaktivnye_veshchestva_vrednye_ve_schestva_gigienicheskie_normativy/5137
34. Матвеев В.В., Хазанов Б.И. Приборы для измерения ионизирующих излучений, М:Атомиздат, 1972.
35. Горн Л.С., Хазанов Б.И. . Избирательные радиометры. М.: Атомиздат, 1975.
36. Волков Н.Г. и др. Методы ядерной спектрометрии. М.: Энергоатомиздат, 1990.
37. Горн Л.С., Хазанов Б.И. Современные приборы для измерения ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1989.
38. Клайнкнехт К. Детекторы корпускулярных излучений. М., 1990.
39. B.J. Lewis, M.J. McCall, A.R. Green, L.G.I. Bennett, M. Pierre, U.J. Schrewe, K. O'Brien and E. Felsberger, "Aircrew Exposure from Cosmic Radiation on Commercial Airline Flights," Radiat. Prot. Dosim. 2001. V.93. N.4. P. 293-314.
40. Olsher R.H., Hsu H.H., Beverding A., Kleck J.H., Casson W.H., Vasislik D.G., Devine R.T. WENDI: An improved neutron REM meter. Health Phys. 2000. V.79. N.2. P.170-180.

41. Birattari C., Esposito A., Pelliccioni M., Rancati T., Silari M. The extended range neutron rem counter LINUS: Overview and latest developments. *Radiat.Prot.Dosim.* 1998. V.76. P. 135-148.
42. Lewis B.J., Tume P., Bennet L.G.I., Pierre M., Green A.R., Cousins T., Hoffarth B.E., Jones T.A. and Brisson J.R. Cosmic radiation exposure on Canadian-based commercial airline routes. *Radiat.Prot.Dosim.* 1999. V.86. P.7-24.
43. Far West Technology. Model FWAD-1 Hawk: Environmental radiation monitor with 5" tissue equivalent proportional counter. Operations and Repair Manual (revision A2) & Unit specific calibration document (Revision A, serial number 001). Far West Technology, 2000.
44. Schrewe, U.J., Alberts, W.G., Alevra, A.V., Ferrari, A. Otto, T. and Silari, M. Calibration Problems, Calibration Procedures and Reference fields for Dosimetry at Flight Altitudes. *Radiat. Prot. Dosim.* 1999. V.86. P.289-295.
45. Матвеева И.С., Смирнов А.Н., Воденников Б.Д., Попов И.М., Семенов Д.С., Колесников М.В., Сыроешкин А.В. Облучение потоком нейтронов как тест на выживаемость спор *Artemia salina* // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2004. Т.138. №11. С. 530-534.
46. Ю.Г. Николаева Г.М. Николаев, К.Н. Тимофеев В.А. Фролов, А.В. Сыроешкин Изучение состояния воды у покоящихся форм *Artemia salina* // Вестник РУДН. Серия Медицина. 2007. № 1. С. 5-9.
47. Vukovic B., Poje M., Varga M., Radolic V., Miklavcic I., Faj D., Stanic D., Planinic J. Measurements of neutron radiation in aircraft // *Applied Radiation and Isotopes.* 2010. V.68. P. 2398-2402.
48. Vukovic B., Radolic V., Lisjak I., Vekic B., Poje M., Planinic J. Some cosmic radiation dose measurements aboard flights connecting Zagreb Airport // *Applied Radiation and Isotopes.* 2008. V.66. P. 247-251.
49. Hiroshi Yasuda, Jaejin Lee, Kazuaki Yajima, Jung A. Hwang and Kazuo Sakai. Measurements of cosmic-ray neutron dose onboard a polar route flight from New-York to Seoul // *Radiation Protection Dosimetry.* 2011. V. 146. N. 1-3. P. 213-216.
50. http://www.thermo.com/eThermo/CMA/PDFs/Product/productPDF_2692.pdf
51. Tommasino L., Caggiati F., Cavaoli M., Notaro M., Teodori R., and Zhou D. Passive Multidetector Stack for the Assessment of Aircrew Exposure. *Environment International* 1996. V.22. P. 115-119.
52. Byrne J., O'Sullivan D., Tommasino L., and Zhou D. New Method for the Rapid evaluation of Z>1 Cosmic Ray Particles- Results from a Balloon Borne Experiment. *Rad. Meas.* 1995. V.25. P. 471-474A.
53. Griffith, R.V., and Tommasino, L. Etch Track Detectors. In *Radiation Dosimetry. In: The Dosimetry of Ionising Radiations.* Kase K., Byangard, B.B., Attix, F.H. Editors. (New York: Academic Press) 1991. V. III. P. 323-426.
54. Fleischer, R.L., Price, P.B., and Walker, R.M. *Nuclear Tracks in Solids: Principles and Applications* (Berkeley: University of California Press) (1975).
55. Frank, A.L., Benton, E.V., Armstrong, T.W., and Colborn, B.L. Neutron Fluences and Dose Equivalents measured with Passive Detectors on LDEF. *Radiation Measurements* 1996. V.26. P. 833-839.
56. O'Sullivan D., Zhou D., Heinrich W., Roesler S., Donnelly J., Keegan R., Flood E., and Tommasino L. Cosmic Rays and Dosimetry at Aviation Altitudes. *Rad. Meas.* 1999. V.31. P.579-584.
57. D. O'Sullivan, Study of Radiation Fields and Dosimetry at Aviation Altitudes, P. 83, Final Report of EC Contract Number: F14P-CT950011, Report 99-0-1, 1996-1999
58. G. Curzio, R.E. Grillmaier, D. O'Sullivan, M. Pelliccioni, S. Piermattei and L. Tommasino. Italian National Survey of Aircrew Exposure. p.39, Agenzia Nazionale per la Protezione dell' Ambiente, Rome, 2000
59. A. Kunz, P. Pihet, E. Arend, H.G. Menzel: An easy-to-operate portable pules-height analysis system for area monitoring with TEPC in radiation protection. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* 1999. V.A299. P.696-701.
60. Kunz, A., Arend, E., Dietz, E., Gerdung, S., Grillmaier, R.E., Lim, T. and Pihet, P. The Homburg Area Monitor HANDI: Characteristics and Optimisation of the Operational Instrument. *Radiat. Prot. Dosim.*, 1992. V.44. N. 1-4. P. 213-218.
61. Gerdung, S., Pihet, P., Grindborg, J.E., Roos, H., Schrewe, U.J. and Schuhmacher, H. Operation and Application of Tissue Equivalent Proportional Counters in Design, Construction and Use of Tissue Equivalent Proportional Counters. Editors: Kliauga, P., Schmitz, T., Waker, A. and Zoetelief, H., *Radiat. Prot. Dosim.* 1995. V.61. N.4.
62. 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 // *Science of the total environment.* 2008. V. 391. P. 177-183.
63. Lantos P. Radiation doses potentially received on-board airplanes during recent solar particle events // *Radiat. Prot. Dosim.*, 2006. V.118. N.4. P.363-374.
64. Daniel Matthia, Bernd Heber, Gunther Reitz, Lembit Sihver, Thomas Berger and Matthias Meier. Ground level event 70 on December 13th, 2006 and related effective doses at aviation altitudes // *Radiat. Prot. Dosim.* 2009. V.136. N.4. P. 304-310.
65. Beck P. Overview of research on aircraft crew dosimetry during the last solar cycle // *Radiat. Prot. Dosim.* 2009. V. 136 N. 4. P. 244-250.
66. Zarrouk N., Bennaceur R. Estimates of cosmic radiation exposure on Tunisian passenger aircraft // *Radiat. Prot. Dosim.*, 2008. V.130. N. 4. P. 419-426.
67. Bottollier-Depois J. F., Beck P., Bennett B. et al. Comparison of codes assessing galactic cosmic radiation exposure of aircraft crew // *Radiat. Prot. Dosim.*, 2009. V.136. N.4. P. 317-323.

68. ICRP The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 2007. V. 37 P. 2–4.
69. Beck, P., Latocha, M., Rollet, S., Dormann, L. and Pelliccioni, M. Measurements and simulation of the radiation exposure to aircraft crew workplaces due to cosmic radiation in the atmosphere. Radiat. Prot. Dosimetry 2007. V. 126. N.1–4. P. 564–567.
70. Roesler S., Heinrich W. and Schraube H. Monte Carlo calculation of the radiation field at aircraft altitudes. Radiat. Prot. Dosimetry 2002. V.98. N 4. P. 367–388.
71. Gaisser, T. K., Honda, M., Lipari, P. and Stanev, T. Primary spectrum to 1 TeV and beyond. Proceedings of the 27th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2001), Hamburg, Germany, 7–15 August 2001, P.643–646.
72. Smart, D. F. and Shea, M. A. World grid of cosmic ray vertical cut-off rigidities for Epoch 1990. Proceedings of 25th International Cosmic Ray Conference, Durban, South Africa, 401–404 (1997).
73. Pelliccioni, M. Overview of fluence-to-effective dose and fluence-to-ambient dose equivalent conversion coefficients for high-energy radiation calculated using FLUKA code. Radiat. Prot. Dosimetry 2000. V.88. N.4. P. 279–297.
74. Mares, V Maczka, T., Leuthold, G. and Ruhm, W Aircrew dosimetry with the new EPCARD.Net code. Radiat. Prot. Dosimetry, 2009. V.136. N. 4. P.317 - 323.
75. Badhwar, G. D., O'Neill, P. M. and Troung, A. G. Galactic cosmic radiation environmental model. Private communication (2000).
76. Butikofer, R., Fluckiger, E. O. and Desorgher, L. Characteristics of near real-time cutoff calculations on a local and global scale. 30th International Cosmic Ray Conference, Merida, Mexico (2007).
77. Mares, V and Leuthold, G. Altitude-dependent dose conversion coefficients in EPCARD. Radiat. Prot. Dosimetry 2007. V.126. N. 1–4. P. 581–584.
78. Schrewe, U. J. Global measurements of the radiation exposure of civil air crew from 1997 to 1999. Radiat. Prot. Dosimetry 2000. V. 91. N.4. P. 347–364.
79. Wissmann, F. Long-term measurements of H*(10) at aviation altitudes in the northern hemisphere. Radiat. Prot. Dosimetry 2006. V.121. N.4. P. 347–357.
80. <http://cosray.unibe.ch/~laurent/planetocosmics/>
81. Garcia-Munoz, M., Mason, G. M. and Simpson, J. A. The Anomalous 4He component in the cosmic ray spectra of ≤ 50 MeV per Z nucleon during 1972–1974. Astrophys. J. 1975. V. 202 P. 265.
82. Peters, B. In: Handbook of Physics. Condon, E. U. and Odishaw, H. Eds. (New York, McGraw-Hill Co), 1958.
83. Gaisser, T. K. and Stanev, T. Cosmic rays. European Phys. J. 1998. V.3. P.132–137.
84. Shea, M. A. and Smart, D. F. Cosmic ray implications for human health. Space Sci. Rev. 2000. V.93. P.187–205.
85. Heinrich, W and Spill, A. Geomagnetic shielding of cosmic rays for different satellite orbits. J. Geophys. Res. 1979. V. 84. N.A8. P. 4401–4004.
86. Lewis, B. J., McCall, M. J., Green, A. R., Bennett, L. G. I., Pierre, M., Schrewe, U. J., O'Brien, K. and Felsberger, E. Aircrew exposure from cosmic radiation on commercial airline routes. Radiat. Prot. Dosimetry 2001. V. 93. N.4. P. 293–314.
87. Lewis, B. J., Bennett, L. G. I., Green, A. R., McCall, M. J., Ellaschuk, B., Butler, A. and Pierre, M. Galactic and solar radiation exposure to aircrew during a solar cycle. Radiat. Prot. Dosimetry 2002. V.102. N.3. P. 207–227.
88. Lewis, B. J., Desormeaux, M., Green, A. R., Bennett, L. G. I., Butler, A., McCall, M. and Saez Vergara, J. C. Assessment of aircrew radiation exposure by further measurements and model development. Radiat. Prot. Dosimetry 2004. V.111. N.2. P.151–171.
89. Takada, M., Lewis, B. J., Boudreau, M., Al Anid, H. and Bennett, L. G. I. Modelling of aircrew radiation exposure from galactic cosmic rays and solar particle events. Radiat. Prot. Dosimetry 2007. V.124(4). P. 289–318.
90. Gleeson, L. J. and Axford, W I. Solar modulation of galactic cosmic rays. Astrophys. J. 1968. V.154. P.1011.
91. Lei, F., Clucas, S., Dyer, C. and Truscott, P. An atmospheric radiation model based on response matrices generated by detailed Monte Carlo simulations of cosmic ray interactions. IEEE Trans. Nucl. Sci. 2004. V. 51(6). P. 3442–3451.
92. Lei, F., Hands, A., Dyer, C. and Truscott, P. Improvements to and validations of the QinetiQ Atmospheric Radiation Model (QARM). IEEE Trans. Nucl. Sci. 2006. V.53(4). P.1851–1858.
93. Dyer, C., Lei, F., Hands, A. and Truscott, P. Solar particle events in the QinetiQ Atmospheric Radiation Model. IEEE Trans. Nucl. Sci. 2007. V. 54(4). P.1071–1075.
94. MCNPX home page: <http://mcnpx.lanl.gov>.
95. Desorgher, L. MAGNETOSCOSMICS Users' Manual, 2003. <http://reat.space.qinetiq.com/septimes/magcos>.
96. ICRP Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26(3–4) (1996).
97. SIEVERT home page: <http://www.sievert-system.org>.
98. Bottollier-Depois, J. F., Blanchard, P., Clairand, I., Dessarps, P., Fuller, N., Lantos, P., Saint-Lo, D. and Trompier, F. An operational approach for aircraft crew dosimetry: the SIEVERT system. Radiat. Prot. Dosimetry 2007. V.125(1–4). P. 421–424.
99. ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1–3).

100. Badhwar G.D., Stephens S.A. Hydrostatic Equilibrium of Gas, Extent of Cosmic Ray Confinement and Radio Emission in the Galaxy. *Astrophys.J.*, 1977, V.212, P.494–506.
101. <http://www.ngdc.noaa.gov/AGA/vmod/igrf.html>
102. Радиобиология человека и животных: Учеб. Пособие/ С.П. Ярмоненко, А.А. Вайнсон; Под ред. С.П. Ярмоненко. – М.: Высш. шк., 2004. – 549 с.: ил.
103. Кудряшов Ю.Б. Радиационная биофизика (ионизирующие излучения) / Под ред. В.К. Мазурика, М.Ф. Ломанова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 448 с.
104. Богданов И.М., Сорокина М.А., Маслюк А.И. Проблема оценки воздействия «малых» доз ионизирующего излучения // *Бюллетень сибирской медицины*, 2005. № 2. С.145–151.
105. Zhou H., Randers-Pehrson G., Waldren C.A., Vannais D., Hall E.J. and Hei T.K. Induction of a bystander mutagenic effect of alpha particles in mammalian cells. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2000. V.97. N.5. P. 2099-2104.
106. Москалёв Ю.И. Современные представления о действии ионизирующих излучений на млекопитающих и проблемы нормирования // *Медицинская радиология*. 1985. №6. С. 66–71.
107. Parsons P.A. Radiation hormesis: an evolutionary expectation and evidence // *Appl. Rad. Isot.* 1990. V. 41. №9. P. 857–860.
108. Блат Дж., Вайскопф В. Теоретическая ядерная физика, перевод с английского - М.- 1954.
109. Котеров А.Н., Никольский А.В. Адаптация к облучению in vivo // *Рад. Биология. Радиоэкология*. 1999. Т. 39. №6. С.648–662
110. Котеров А.Н., Никольский А.В. Молекулярные и клеточные механизмы адаптивного ответа у эукариот // *Укр.биохим. журн.* 1999. Т. 71. №3. С. 13–25
111. Honglu Wu, Janice L. Huff, Rachel Casey, Myung-Hee Kim, Francis A. Cucinotta Chapter 5: Risk of acute radiation syndromes due to solar particle events P. 171 – 190 <http://spaceradiation.usra.edu/references/Ch5SPE.pdf>
112. Кузин А. М. Вторичные биогеенные излучения – лучи жизни. // *Пушино*. 1997. – 38 с.
113. Кузин А. М. Идеи радиационного гормезиса в атомном веке. — М.: Наука. 1995.
114. Богданов И.М., Сорокина М.А., Маслюк А.И. Проблема оценки эффектов воздействия малых доз ионизирующего излучения. // *Бюллетень сибирской медицины*. 2005. №2. С.145–151.
115. Рождественский Л.М. Концепция биологического действия ионизирующей радиации низкого уровня (анализ проблемы в аспектах пороговости эффектов и радиочувствительности и радиореактивности биоструктур различного уровня организации). // *Рад. Биология. Радиоэкология*. 1999. Т. 39. №1. С. 181–188.
116. Naumers R.S. and Korf S.A. Slow-Neutron Intensity at High Balloon Altitudes // *Physical reviv.* 1960. V. 120. №4 (15). P.1460–1462.
117. Лютых В.П., Долгих А.П. Клинические аспекты действия «малых» доз ионизирующего излучения на человека (общесоматические заболевания) // *Мед. Радиол. И радиац. Безопасность*. - 1998. - Т.43.- №2. -С. 28-34.
118. Спитковский Д.М. О некоторых новых биофизических аспектах механизмов при воздействии «малых» и близких к ним доз ионизирующих излучений (низких ЛПЭ) на клетки эукариот // *Рад. биология. Радиоэкология*. 1999. Т.39. №1. С.145–155.
119. Ставицкий Р. В. Гуслистый В.П., Беридзе А.Д. Определение «малых» доз радиационного воздействия путём аналитической обработки показателей крови // *Мед. Радиол. и радиац. безопасность*. 1998. Т. 43. №1. С.58–61.
120. Ставицкий Р. В, Лебедев Л.А., Мехечеев А.В. некоторые вопросы действия «малых» доз ионизирующего излучения. // *Мед. Радиол. и радиац. безопасность*. 2003. Т.48. №1. С.30–39.
121. Zeeb H., Hammer G. P. and Blettner M. Epidemiological investigations of aircrew: an occupational group with low-level cosmic radiation exposure // *J. Radiol. Prot.* 2012. V. 32. P.15–19.
122. Kaji M, Tango T, Asukata I, Tajima N, Yamamoto K, Yamamoto Y, et al. Mortality experience of cockpit crewmembers from Japan Airlines. *Aviat Space Environ Med.* 1993. 64(8). 748–750.
123. Band PR, Spinelli JJ, Ng VT, Moody J, Gallagher RP. Mortality and cancer incidence in a cohort of commercial airline pilots. *Aviat Space Environ Med.* 1990. V.61. P.299–302.
124. Band PR, Le ND, Fang R, Deschamps M, Coldman AJ, Gallagher RP, et al. Cohort study of Air Canada pilots: mortality, cancer incidence, and leukemia risk. *Am J Epidemiol.* 1996. V. 143. P.137–143.
125. Salisbury DA, Band PR, Threlfall WJ, Gallagher RP. Mortality among British Columbia pilots. *Aviat. Space Environ. Med.* 1991. V.62. P. 351–352.
126. Irvine D, Davies DM. The mortality of British Airways pilots, 1966–1989: a proportional mortality study. *Aviat Space Environ Med.* 1992. V. 63. P. 276–279.
127. Hammer GP, Blettner M, Zeeb H. Epidemiological studies of cancer in aircrew. *Radiat Prot Dosimetry.* 2009. V.136. P.232–239.
128. Blettner M, Zeeb H, Auvinen A, Ballard TJ, Caldora M, Eliasch H, et al. Mortality from cancer and other causes among male airline cockpit crew in Europe. *Int J Cancer.* 2003. V.106. P. 946–952.
129. Zeeb H, Blettner M, Langner I, Hammer GP, Ballard TJ, Santaquilani M, et al. Mortality from cancer and other causes among airline cabin attendants in Europe: a collaborative cohort study in eight countries. *Am J Epidemiol.* 2003. V.158. P.35–46.

130. Langner I, Blettner M, Gundestrup M, Storm H, Aspholm R, Auvinen A, et al. Cosmic radiation and cancer mortality among airline pilots: results from a European cohort study (ESCAPE). *Radiat Environ Biophys.* 2004. V.42. P.247–56.
131. Zeeb H, Hammer GP, Langner I, Schafft T, Bennack S, Blettner M. Cancer mortality among German aircrew: second follow-up. *Radiat Environ Biophys.* 2010. V.49. P.187–94.
132. Pukkala E, Aspholm R, Auvinen A, Eliasch H, Gundestrup M, Haldorsen T, et al. Incidence of cancer among Nordic airline pilots over five decades: occupational cohort study. *BMJ.* 2002. V. 325. P.567.
133. Frasch G, Fritzsche E, Kammerer L, Karofsky R, Spiesl J, Stegemann R. The occupational radiation exposure in Germany 2007 [in German]. *Salzgitter: Bundesamt für Strahlenschutz; 2009 May. Report No.: BfS-SG-12/09.*
134. Hammer GP, Zeeb H, Tveten U, Blettner M. Comparing different methods of estimating cosmic radiation exposure of airline personnel. *Radiat Environ Biophys.* 2000. V.39. P. 227–231.
135. Hammer G. P., Blettner M., Langner I., Zeeb H. Cosmic radiation and mortality from cancer among male German airline pilots: extended cohort follow-up // *Eur J Epidemiol* 2012. V. 27. P.419–429.
136. Irvine D, Davies DM. British Airways flightdeck mortality study, 1951–1992. *Aviat Space Environ Med* 1999; V.70. P. 591–595.
137. Bagshaw M. Cosmic radiation in commercial aviation // *ravel Medicine and Infectious Disease* (2008) 6, 125–127.
138. Rafnsson V, Olafsdottir E, Hrafnkelsson J, Sasaki H, Arnarsson A, Jonasson F. Cosmic radiation increases the risk of nuclear cataract in airline pilots: a population-based case–control study. *Arch Ophthalmol* 2005;V.123, P.1102–1105.
139. Chen J., Lewis B. J., Bennett L. G. I., Green A. R. and Tracy B. L. Estimated neutron dose to embryo and foetus during commercial flight. // *Radiation Protection Dosimetry* (2005) Vol. 114, No. 4, P. 475–480.
140. Chen, J. Mathematical models of the embryo and foetus for use in radiological protection. *Health Phys.* 2004. V.86(3), P. 285–295.
141. Rafnsson V., Hrafnkelsson J., Tulinius H. Incidence of cancer among commercial airline pilots // *Occup Environ Med* 2000; V.57, P. 175–179.
142. Yong L.C., Sigurdson A.J., Ward E.M., Waters M.A., Whelan E.A., Petersen M.R., Bhatti P., Ramsey M.J., Ron E., Tucker J.D. Increased frequency of chromosome translocations in airline pilots with long-term flying experience // *Occup. Environ. Med.* 2009; V.66; P.56-62.
143. Кларк Р. // *Мед. радиология и радиационная безопасность.* 2003. №4. С. 26 – 37.
144. Bartlett D.T. Radiation protection aspects of the cosmic radiation exposure of aircraft crew // *Radiation Protection Dosimetry* – 2004. – V.109. – N.4. - P. 349 – 355.
145. Al Anid H., Lewis B. J., Bennett L. G. I., Takada M. and Duldig M. Aircrew radiation dose estimates during recent solar particle events and the effect of particle anisotropy // *Radiation Protection Dosimetry* – 2013. - P. 1 – 13.
146. 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.
147. Chatterjee A. Reduced glutathione: a radioprotector or a modulator of DNA-repair activity? *Nutrients.* 2013; 5(2): 525-542.
148. Bourcier C., Levy A., Vozenin M.C., Deutsch E. Pharmacological strategies to spare normal tissues from radiation damage: useless or overlooked therapeutics? *Cancer Metastasis Rev.* 2012, 31(3-4):699-712.
149. Brizel D.M. Pharmacologic approaches to radiation protection. *J. Clin. Oncol.* 2007; 25(26):4084-4089.
150. Shirazi A., Ghobadi G., Ghazi-Khansari M. A radiobiological review on melatonin: a novel radioprotector. *J. Radiat. Res.* 2007; 48(4): 263-272.
151. Novak, K.M. (ed.). *Drug Facts and Comparisons 59th Edition 2005.* Wolters Kluwer Health. St. Louis, Missouri 2005.
152. Thomson. *Micromedex. Drug Information for the Health Care Professional. 25th ed. Volume 1. Plus Updates.* Content Reviewed by the United States Pharmacopeial Convention, Inc. Greenwood Village, CO. 2005.
153. Nair C.K., Devi P.U., Shimanskaya R., Kunugita N., Murase H., Gu Y.H., Kagiya T.V. Water soluble vitamin E (TMG) as a radioprotector. *Indian J. Exp. Biol.* 2003; 41(12): 1365-1371.
154. Wasserman T.H., Brizel D.M. The role of amifostine as a radioprotector. *Oncology (Williston Park).* 2001; 15(10): 1349-1354.
155. Wang H., Zhu B., He Z., Fu H., Dai Z., Huang G., Li B., Qin D., Zhang X., Tian L., Fang W., Yang H. Deuterium-depleted water (DDW) inhibits the proliferation and migration of nasopharyngeal carcinoma cells in vitro. // *Bio-med Pharmacother.* 2013; 67(6): 489-496.
156. Gyöngyi Z., Budán F., Szabó I., Ember I., Kiss I., Krempels K., Somlyai I., Somlyai G. Deuterium depleted water effects on survival of lung cancer patients and expression of Kras, Bcl2, and Myc genes in mouse lung// *Nutr Cancer.* 2013; 65(2): 240-246.
157. Wang H., Liu C., Fang W., Yang H. Research progress of the inhibitory effect of deuterium-depleted water on cancers// *Nan. Fang Yi Ke Da Xue Xue Bao.* 2012; 32(10): 1454-1456.
158. Somlyai G., Molnár M., Laskay G., Szabó M., Berkényi T., Guller I., Kovács A. Biological significance of naturally occurring deuterium: the antitumor effect of deuterium depletion// *Orv. Hetil.* 2010; 151(36): 1455-1460.
159. Cong F.S., Zhang Y.R., Sheng H.C., Ao Z.H., Zhang S.Y., Wang J.Y. Deuterium-depleted water inhibits human lung carcinoma cell growth by apoptosis// *Exp. Ther. Med.* 2010; 1(2): 277-283.