

ПОЧТИ 70-ЛЕТНИЙ ОПЫТ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОБИОЛОГИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННЫХ РИСКОВ В ПРОЦЕССЕ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ И СУММАРНОГО РАДИАЦИОННОГО РИСКА В ТЕЧЕНИЕ ЖИЗНИ КОСМОНАВТОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПОЛЕТА НА МАРС

А.В. Шафиркин

Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

NEARLY 70 YEARS OF EXPERIENCE IN SPACE RADIOBIOLOGY TO ASSESS RADIATION RISKS DURING SPACE FLIGHTS, AND THE TOTAL LIFETIME RADIATION RISK OF ASTRONAUTS AS A RESULT OF A FLIGHT TO MARS

A.V. Shafirkin

Institute of Medical and Biological Problems, Moscow, Russia

Реферат

Рассмотрены имеющаяся научная база и подходы в СССР (России) и в США для решения вопросов радиационного нормирования при орбитальных и межпланетных полетах. Оценены возможности разработанных в России нового функционала “обобщенная доза” и модели эффективной остаточной дозы, учитывающие комплексно восстановительные процессы в организме, для изменения представлений об опасности космических излучений (КИ). Приведены оценки суммарного радиационного риска (СРР) и возможного сокращения продолжительности жизни (ПЖ) после завершения 2-летнего полета на Марс в период максимума солнечной активности (СА), за различными толщинами защиты космического аппарата (КА). На основе новых данных за последние 35 лет о максимальных (более высоких в 2–2,5 раза) значений коэффициентов относительной биологической эффективности (ОБЭМ) для высокоэнергетичных ядер галактических космических лучей (ГКЛ) при малых поглощенных дозах 0,01–0,05 сГр предложена новая зависимость коэффициентов качества от ЛПЭ применительно к риску отдаленных неблагоприятных эффектов. Вместе с новыми, в 2 раза более высокими коэффициентами модификации радиационного ответа за счет других факторов полета, обобщенные дозы и величины СРР возрастут в 4–5 раз. Будут рассмотрены предложения для снижения величин обобщенных доз от ГКЛ и оценены новые величины СРР и сокращения ПЖ в результате полета на Марс.

Ключевые слова: полет на Марс, риски в полете, суммарный радиационный риск, сокращение продолжительности жизни, модель эффективной остаточной дозы, восстановительные процессы, обобщенная доза

Abstract

This article examines the existing scientific base and approaches in the USSR (Russia) and the USA for addressing radiation standardization issues during orbital and interplanetary missions. It evaluates the potential of new Russian-developed “generalized dose” functionality and effective residual dose models, which take into account comprehensive recovery processes in the body, to change understanding of the dangers of cosmic radiation (CR). Estimates of the total radiation risk (TRR) and the possible reduction in life expectancy (LE) after the completion completing of a two-year mission to Mars during the period of maximum solar activity (SA), behind different thicknesses of spacecraft (SC) shielding, are presented. Based on new

data from the past 35 years on maximum (2–2.5 times higher) relative biological effectiveness (RBEM) coefficients for high-energy galactic cosmic ray (GCR) nuclei at low absorbed doses of 0.01–0.05 cGy, a new dependence of quality factors (QFL) on the linear energy transfer (LET) is proposed for the risk of long-term adverse effects. Together with the new, twice-higher modification factors (MFL) of the radiation response due to other flight factors, the generalized doses and TRR values will increase by 4–5 times. Proposals for reducing the generalized doses from GCRs will be considered, and new TRR values and lifespan reductions resulting from a mission to Mars will be estimated.

Key words: flight to Mars, flight risks, total radiation risk, reduction in life expectancy, effective residual dose model, recovery processes, generalized dose

E-mail: a.v.shafirkin@mail.ru

<https://doi.org/10.52775/1810-200X-2026-110-2-100-122>

Введение

В 50–70 гг., в связи с ядерной угрозой в результате массированных испытаний на земле и под землей ядерного оружия, для обеспечения радиационной безопасности населения во многих лабораториях мира проведены многочисленные радиобиологические исследования с источниками рентгеновского и гамма-излучений. Эксперименты осуществлялись на большом количестве мелких лабораторных животных (МЛЖ) и крупных млекопитающих, как в лабораторных условиях в виде острых кратковременных повторных воздействий или протяженных облучений в широком диапазоне доз и мощностей доз 10^{-2} – 10^3 Гр/сут, так и на различных расстояниях от эпицентра ядерного взрыва и по следу радиоактивного облака с переменной мощностью дозы [1–13].

С учетом восстановительных процессов на уровне организма было изучено формирование радиационного поражения в различных быстро обновляющихся радиочувствительных системах организма: кроветворной системе, коже, эпителии хрусталика глаза, эпителиальных клеток в желудочно-кишечном тракте (ЖКТ) и ряде других после каждого из рассматриваемых облучений в зависимости от дозы. При этом экспериментаторы количественно определяли глубину развития радиационного поражения во времени, оценивали снижение скорости протекания восстановительных процессов, обусловленное снижением функциональных резервов организма. Были получены материалы о видовой радиочувствительности различных млекопитающих и других биологических объектов, определены кривые смертности, среднелетальные дозы и продолжительность жизни животных в зависимости от дозы и мощности дозы радиационного воздействия.

Многими авторами исследований для описания закономерностей формирования радиационного поражения в отдельных системах организма, согласования наблюдаемых в экспериментах изменений величин среднелетальных доз, устойчивости организма к последующим облучениям, а также прогноза снижения продолжительности жизни (ПЖ) животных, делались попытки использовать широко представленную в литературе математическую модель эффективной остаточной дозы Х. Блэра [1–3]. Модель впервые была предложена автором в 1952 г., рассматривалась им в последующих его работах, а также активно проверялась другими исследователями [4–10]. Это наиболее простая модель эффективной остаточной дозы $D_{эф}(t)$ с двумя линейными дифференциальными уравнениями и с двумя постоянными коэффициентами: необратимой части поражения f и скорости восстановления на уровне организма β сут $^{-1}$ для обратимой ее части $(1-f)$. Так, после протяженного облучения с мощностью дозы γ , длительностью τ , выражение для $D_{эф}(t)$ имеет следующий вид:

$$D_{эф}(t) = [(1-f)/\beta] \gamma [1 - \exp(-\beta\tau)] e^{-\beta(t-\tau)} + f\gamma\tau. \quad (1)$$

Таким же простым оно является для описания эффективной остаточной дозы после острых радиационных воздействий в дозе D_0 :

$$D_{эф}(t) = D_0[f + (1-f)\exp(-\beta t)]. \quad (2)$$

Из этих уравнений на основе отношения эффективной и суммарной поглощенной дозы легко рассчитывается коэффициент КВБ, определяющий кратность снижения эффективности радиационного воздействия за счет восстановительных процессов на уровне организма (коэффициент времени по отношению к ближайшим радиационным эффектам после облучения). Так, при протяженном облучении дли-

тельностью τ , с мощностью дозы γ , расчетное значение КВБ по снижению эффективности воздействия на радиочувствительные ткани и повышению радиационной устойчивости организма определяется на основе уравнения (1):

$$КВБ = (1 - f) [1 - \exp(-\beta\tau)] / \beta\tau + f,$$

а после острого облучения в дозе D_0 к моменту времени t на основе уравнения (2):

$$КВБ = [f(1 - f)\exp(-\beta\tau)].$$

Однако сведение сложного комплекса восстановительных и компенсаторных процессов, протекающих на разных уровнях биологической интеграции с разной скоростью, лишь к постоянному значению параметра β , и отсутствие обоснования постоянства необратимой части радиационного поражения f при различных условиях радиационного воздействия приводило к большим расхождениям значений самих параметров модели при описании результатов различных экспериментов. Кроме того, отмечали различный характер формирования во времени расчетных значений эффективных остаточных доз $D_{эф}(t)$, определяющих устойчивость к последующим облучениям, и наблюдали значительный разброс прогнозных расчетных значений продолжительности жизни (ПЖ) животных по сравнению с опытными данными.

Представленный в литературе многократный разброс параметров модели Х. Блэра затруднял ее практическое использование для расчетов эффективных остаточных доз $D_{эф}(t)$ при сложном характере распределения дозы во времени (например, при облучении с переменной мощностью дозы по следу радиоактивного облака) применительно к решению задач радиационного нормирования на Земле. Трудно ее было также использовать для оценки опасности воздействия на космонавтов солнечных космических лучей (СКЛ) при осуществлении орбитальных или межпланетных полетов во время развития во времени мощных солнечных протонных событий (СПС) в периоды максимума солнечной активности (СА).

К 1975 г. отечественными учеными и зарубежными исследователями представлены в монографиях и обобщены указанные выше обширные экспериментальные материалы о глубине повреждений в различных системах организма в условиях сложного временного и пространственного распределения поглощенных доз с учетом восстановительных процессов на уровне организма [4–10]. В них подробно рассмотрены дан-

ные экспериментов с непродолжительными облучениями МЛЖ и крупных млекопитающих в течение 5–10 сут в широком диапазоне изменения мощностей доз, в пределах 0,01–140 Зв/сут [7–10]. Было показано кратное снижение эффективности радиационного воздействия по мере уменьшения мощности дозы почти на 5 порядков. Наблюдалось столь же выраженное увеличение величин среднелетальных доз $LD_{50/30}$ и $LD_{50/60}$ за счет реализации быстрых восстановительных процессов на клеточном уровне в быстро обновляющихся радиочувствительных тканях: кроветворной ткани, коже, эпителии ЖКТ и др. Проводилось также большое число экспериментов на МЛЖ с длительными облучениями в течение нескольких лет с очень низкими значениями мощностей доз вплоть до 10 мкЗв/сут. В этом случае наряду с быстрыми процессами восстановления на клеточном уровне в быстро обновляющихся радиочувствительных тканях подключаются также дополнительно восстановительные процессы на уровне организма с нормальной физиологической адаптацией, без напряжения регуляторных систем. В этом случае компенсаторные резервы сохраняются на уровне контрольных животных, и ПЖ хронически облучаемых МЛЖ или собак с малой мощностью дозы практически не отличается от таковой у контрольных животных. Имеются даже публикации о наличии явления гормезиса, когда ПЖ облучаемых с малой мощностью дозы животных в эксперименте несколько превышала среднюю ПЖ контрольных животных. В работе Кузина А.М. [11] наличие гормезиса им объясняется стимуляцией иммунной системы у части популяции животных и меньшим риском заболеваемости органов дыхания.

В отношении риска ближайших неблагоприятных радиационных последствий было представлено большое число экспериментальных данных, касающихся зависимой от дозы первичной лучевой реакции (ПЛР) организма различной степени выраженности непосредственно в первые сутки или даже часы после облучения животных и человека. По мере увеличения доз наблюдали более частые и усиливающиеся проявления ПЛР, связанные с развитием негативных проявлений, приводящих к ухудшению самочувствия, изменению поведения и работоспособности животных и человека.

Дозовые зависимости риска для различных проявлений ПЛР применительно к человеку установлены на основе данных атомных бомбардировок, клинических обследований лиц, по-

страдавших от ядерных аварий и больных раком, облучавшихся с терапевтическими целями [7, 8, 10, 14–18]. При острых кратковременных облучениях в среднетканевых эквивалентных дозах 250–500 мЗв имеют место слабо выраженные симптомы лучевой болезни первой степени: слабость, головная боль, снижение аппетита, легкое головокружение. Работоспособность человека при этом не нарушена. Имеет место снижение концентрации лейкоцитов, тромбоцитов и лимфоцитов в крови на 20–25 %. Из-за вариации индивидуальной радиочувствительности в 1–5 % случаев возможны проявления ПЛР 2-й степени, с более выраженными нарушениями состояния организма человека, сопровождающимися также общей слабостью, стойкой тошнотой, выраженным снижением аппетита (может сопровождаться однократной рвотой), головной болью, головокружением, нарушением сна, что уже снижает работоспособность у этого ограниченного контингента. При дозах 0,5–1 Зв ПЛР в более выраженной форме имеет место у 5–10 % индивидуумов. Отмечается умеренная аплазия костного мозга, происходит дальнейшее снижение концентрации лейкоцитов и тромбоцитов в крови до 60–70 %. Число лимфоцитов снижается вдвое. Лимфопения может отмечаться на протяжении до 2 лет [7, 8, 10, 14–18].

В 1957 г. с первым искусственным спутником Земли началась эра орбитальных космических полетов с приоритетом космических исследований в СССР (России). Очень важными являлись пионерские исследования на первом этапе освоения космического пространства, проводившиеся в ГНИИИ авиационной и космической медицины МО СССР (ГНИИИ АиКМ МО СССР) в 30–60 гг. в “ближнем космосе” на высотных шарах и баллистических ракетах, которые продолжались на искусственных спутниках Земли. Вместе со специалистами этого института участвовали в этих исследованиях также сотрудники Института биофизики Минздрава СССР (в настоящее время ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА), Института космических исследований АН СССР, Научно-исследовательском институте ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ (НИИЯФ МГУ), а несколько позже и Института медико-биологических проблем Минздрава СССР (в настоящее время Институт медико-биологических проблем РАН). Целью этих исследований являлось изучение состава и спектра источников космических излучений в ближайшем околоземном пространстве. Они проводились с использованием дозиметрической аппаратуры, разме-

щенной на шарах – зондах, запускаемых в стратосферу на ракетах Р-2 и Р-5 на расстояниях 100–450 км от Земли и позже на искусственных спутниках Земли и орбитальных космических кораблях. Эти данные, с характеристиками космических излучений – потоками частиц и их спектрами – опубликованы в работах [7, 17–20].

Было установлено, что радиационные воздействия в условиях космического полета носят значительно более сложный характер как по качественному составу источников космических излучений (КИ), так и по пространственно-временному распределению поглощенных доз по телу. Этот характер радиационного воздействия существенно отличается от стандартных условий облучения на Земле при проведении представленных выше радиобиологических исследований. Радиационную опасность для космонавтов представляют детерминированные источники облучения – галактические космические лучи (ГКЛ) и радиационные пояса Земли (РПЗ). Кроме того, в периоды максимума солнечной активности (СА), при недостаточной физической защите космических аппаратов, значительную опасность представляют солнечные космические лучи (СКЛ) в результате реализации мощных солнечных протонных событий (СПС) с выбросом в космическое пространство больших потоков высокоэнергетичных протонов. Сложность обеспечения безопасности обусловлена тем, что реализация СПС носит стохастический характер во времени.

Активная реализация программ освоения космического пространства в СССР потребовала решения целого комплекса проблем по обеспечению общей и в том числе радиационной безопасности орбитальных пилотируемых космических полетов. Физиками, радиобиологами и гигиенистами указанных выше институтов, вместе с сотрудниками Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) в г. Дубне, начал проводиться широкий спектр исследований по новой дисциплине – космической радиобиологии. К 90-ым гг. в СССР, кроме указанных выше исследований по влиянию временной и пространственной неравномерности радиационного воздействия, в течение более 40 лет проводились многочисленные эксперименты на ускорителях с целью определения значений коэффициентов относительной биологической эффективности (ОБЭ) протонов и ускоренных многозарядных ионов в широком диапазоне энергий по отношению к эффектам гамма и же-

сткого рентгеновского излучений. Это было необходимо для установления зависимости коэффициентов качества (КК) космических излучений от линейной передачи энергии (ЛПЭ) тканям и определения эквивалентных доз. Подробно эти материалы будут рассмотрены ниже.

Рассмотренные выше результаты исследований по общей радиобиологии и космической радиобиологии представляли обширную базу данных по реакциям отдельных систем и целостного организма у животных и человека при их гамма- и рентгеновском облучении, а также воздействию быстрых и тепловых нейтронов на Земле в широком диапазоне доз, вполне достаточную для решения вопросов радиационного нормирования применительно к непродолжительным орбитальным околоземным полетам, а также полетам к Луне длительностью до 30 сут. Поэтому исследователи в нашей стране и в США, при тесном сотрудничестве на астронавтических конгрессах 1964–1965 гг., пришли к близким согласованным значениям пределов доз на космонавтов (астронавтов) [5, 6, 17, 18, 21, 22]. Величины допустимых доз были основаны на анализе и серьезном обобщении результатов большого объема проведенных в мире экспериментальных исследований на крупных млекопитающих, аварийному облучению людей. При их разработке был обобщен также большой клинический материал, касающийся осложнений при лучевой терапии в нашей стране и за рубежом [5–10, 12–18]. В тот период физиологи и гигиенисты единодушно считали, что основную опасность представляют протоны СКЛ во время развития мощных СПС, и важно было исключить риск развития ПЛР средней степени тяжести, а также снижения концентрации клеток крови более, чем на 25 % в радиочувствительных тканях: в кроветворной системе, коже, эпителии хрусталика глаза и эпителии ЖКТ, что могло бы привести к снижению работоспособности космонавтов (астронавтов) в процессе полета.

Предел дозы для одного СПС в первых нормативах для кратковременных полетов в СССР был утвержден равным 150 мЗв. При этой дозе отсутствуют какие-либо соматические эффекты, а могут отмечаться лишь минимальные кратковременные сдвиги в системе кроветворения. Ввиду стохастического характера воздействия протонов солнечных вспышек и жестких ограничений по толщине и весу защиты космического аппарата, вводилось также понятие дозы

оправданного риска (ДОР). В качестве ДОР исследователи в СССР рекомендовали дозу 500 мЗв на костный мозг (на глубине 5 см ткани), при которой лишь в единичных случаях могут иметь место легкие проявления первичной лучевой реакции. Критическая доза 1,25 Зв устанавливалась как критерий для решения вопроса о возможности дальнейшего продолжения полета в условиях ухудшенной радиационной ситуации. В США первые нормативы использовали близкие к российским регламенты доз. В частности, для программы “Аполлон” была утверждена допустимая (планируемая) доза 250 мЗв и максимальная оперативная доза 500 мЗв на глубине 5 см [5, 6, 17, 18, 21, 22].

Исследования по установлению радиационных рисков от источников КИ и обеспечению радиационной безопасности длительных орбитальных полетов и полетов на Марс

В КБ Королева С.П. уже в 1963 г. проектировался космический корабль для полета на МАРС, и встала задача обеспечения безопасности экипажа, расчета необходимой физической защиты от космических излучений и обоснования допустимых поглощенных доз для полетов длительностью до 3 лет. В связи с этим 28 октября 1963 г. на основании Постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР и приказа Министра здравоохранения СССР был создан Институт медико-биологических проблем МЗ СССР. Задачей нового института являлось обеспечение общей, в том числе и радиационной безопасности (РБ) длительных орбитальных полетов и планируемых полетов на Луну и на Марс. В структуре ИМБП МЗ СССР в феврале 1964 г. создается специальное научное подразделение – сектор № 3. В задачи этого подразделения входило обеспечение радиационной безопасности длительных пилотируемых орбитальных полетов и перспективных, как полагали в скором будущем, полетов к Луне и на Марс.

В ИМБП Минздрава СССР в рамках медико-биологического сопровождения пилотируемых космических полетов осуществлялся аппаратный дозиметрический контроль радиационной обстановки в различных отсеках космических аппаратов и проводилась индивидуальная дозиметрия всех членов экипажей ко-

раблей и станций, начиная с корабля “Восход-2”, запущенного в 1965 г. В секторе была организована специальная служба радиационной безопасности. В случае ухудшения радиационной обстановки, в связи с активацией ядерных процессов на Солнце в периоды максимума СА и выбросами больших потоков высокоэнергичных протонов, направленных к Земле, к работе службы привлекались ведущие научные сотрудники физики и радиобиологи – для решения оперативных вопросов РБ. Поскольку более высокую опасность представляют мощные СПС, с большими потоками протонов СКЛ, при совпадении их во времени с мощными магнитными бурями, то работа службы в эти периоды проводилась по графикам в круглосуточном режиме в тесной кооперации с сотрудниками Научно-исследовательского института ядерной физики (НИИЯФ МГУ), Института прикладной геофизики Госгидромета, Астрофизической лаборатории и Института земного магнетизма АН СССР.

Разработка нового дозиметрического функционала “обобщенной дозы”

Как было показано выше, в отличие от характера радиационного воздействия на Земле, которое в основном обусловлено излучениями с низкими значениями ЛПЭ и является в большинстве случаев равномерным, радиационное воздействие в условиях космического полета на орбите и вне магнитосферы Земли характеризуется сложным составом излучений и их энергетического спектра, простирающегося от нескольких кэВ до сотен ГэВ, которые различаются в значительной степени по своей биологической эффективности. Это воздействие обусловлено как детерминированными источниками излучения, включающими ГКЛ и РПЗ, так и стохастическим воздействием корпускулярного излучения при развитии СПС. Оно характеризуется значительной неравномерностью распределения доз как по глубине тела, так и во времени.

В ИМБП Минздрава СССР была начата разработка нового дозиметрического функционала – “обобщенной дозы”. Этот дозиметрический функционал необходим для приведения сложного характера радиационного воздействия КИ к стандартным условиям радиационных воздействий на Земле (острое кратковременное, равномерное гамма- или жесткое рентгеновское

облучение), для которых уже были известны многие ближайшие и ряд отдаленных неблагоприятных последствий воздействия радиации. Первоначально выражение для обобщенной эквивалентной дозы H (Зв) было обосновано в 1970 г. в работе [23]. Позже в 1983 г. оно вошло в нормативный документ ГОСТ 25645. 201-1983. Термины и определения “Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете (БРЭКАКП)” [17, 18, 24] и было представлено в нем в виде:

$$H[\text{Зв}] = \bar{D} [\text{Гр}] \cdot \text{КК} \cdot \text{КВ} \cdot \text{КР}, \quad (3)$$

где H – обобщенная эквивалентная доза; $\bar{D}$ – среднетканевая поглощенная доза.

КК – коэффициент качества рассматриваемого источника космических излучений (протонов или ускоренных многозарядных ионов с соответствующей энергией, МэВ/нуклон) определяется на основе оцененного значения коэффициента ОБЭ и характеризуется определенной величиной ЛПЭ, кэВ/мкм, в соответствии с нормативным руководящим документом РД 50-25645.206-84. “БРЭКАКП. Методика расчета ионизационных потерь и пробегов тяжелых заряженных частиц” [25].

КВ – коэффициент временной неравномерности радиационного воздействия, зависящий от режима фракционирования острых кратковременных радиационных воздействий, мощности дозы и длительности облучения при протяженном облучении, характеризующий снижение эффективности радиационного воздействия за счет осуществления восстановительных процессов на уровне организма, определяемый на основе отношения эффективной остаточной дозы к суммарной накопленной дозе на данный момент времени.

КР – коэффициент равноценности радиационного воздействия, учитывающий влияние пространственной неравномерности и глубинного перепада поглощенных доз по телу на радиобиологические эффекты в радиочувствительных тканях и величины среднелетальных доз.

Выражения для обобщенных доз в процессе последующей доработки концепции записывались отдельно для ближайших (H_b) в процессе полета неблагоприятных эффектов, рассмотренных ранее, и отдаленных неблагоприятных последствий (H_o), в том числе таких интегральных, как суммарный радиационный риск (СРР) в течение жизни и возможное сокращение средней предстоящей продолжительности жизни

(СППЖ), которые представлены в работах [17, 18, 26–28]. Эти выражения имеют вид:

$$H_B = \left(\sum_{i=1}^n \bar{D}_i \cdot KK_{Bi} \cdot KB_{Bi} \cdot KP_{Bi} \right) \cdot KM_B, \quad (4)$$

$$H_O = \left(\sum_{i=1}^n \bar{D}_i \cdot KK_{Oi} \cdot KB_{Oi} \cdot KP_{Oi} \right) \cdot KM_O, \quad (5)$$

где H_B и H_O – обобщенные дозы применительно к ближайшим неблагоприятным эффектам в процессе полета и рискам отдаленных неблагоприятных последствий.

$\bar{D}$ – среднетканевая поглощенная доза от различных источников радиационной опасности при космических полетах ГКЛ, протонов СКЛ, протонов и электронов РПЗ и потоков вторичных частиц из защиты космических аппаратов, включая нейтроны. Она определяется на основе расчетов глубинных распределений доз за защитой при наличии конструкторской документации конкретных космических аппаратов с использованием как функции экранированности защитой и оборудованием, так и фантомов, представляющих стандартизованную модель тела человека [17, 18, 29].

Коэффициенты KK , KB и KP , связанные с влиянием на радиобиологические эффекты пространственной неравномерности радиационного воздействия, а также коэффициенты модификации (KM) радиационного ответа организма за счет дополнительного воздействия нерадиационных стрессовых факторов полета также оцениваются для ближайших и отдаленных неблагоприятных эффектов. Они рассчитываются на основе анализа представленных в литературе радиобиологических данных, закрепляются путем выпуска международных нормативов в публикациях МКРЗ, а также соответствующих российских руководящих документов или ГОСТ-ов по проблеме БРЭКАКП, либо отражаются в санитарно-гигиенических нормативных документах по радиационной безопасности орбитальных полетов, принятых в России. [17, 18, 26–28]. Эти документы через некоторое время пересматриваются по мере получения новых экспериментальных данных о величинах радиационных рисков в процессе полетов и СРР для космонавтов в течение их жизни.

Для зависимости KK_B от ЛПЭ к настоящему времени в литературе представлена лишь одна работа [30] и отсутствует пока нормативный документ, поэтому в настоящее время используют для расчетов обобщенной дозы H_B либо рекомендации (Публикация 60 МКРЗ [31] от 1990 г.), либо

российский нормативный документ, утвержденный в 1991 г. ГОСТ 25645.218-90 “Зависимость коэффициента качества космических излучений от линейной энергии” [32]. Эти же документы применяют для расчетов обобщенных эквивалентных доз H_O . В этом случае для зависимости KK от ЛПЭ используют значения KK_O , определяемые на основе представленных в литературе коэффициентов ОБЭ для ускоренных многозарядных ионов, как модели высокоэнергетических ядер ГКЛ, применительно к отдаленным неблагоприятным эффектам.

Расчеты значений KB_B для определения эффективности радиационных воздействий при различном характере фракционированных острых облучений во времени или протяженных облучений в широком диапазоне мощностей доз проводили с учетом восстановительных процессов на уровне организма. Это осуществлялось на основе модели эффективной остаточной дозы Х. Блэра и некоторых ее модификаций [1–10]. В настоящее время для этого используют новую модель эффективной остаточной дозы, разработанную в ИМБП Минздрава СССР [16–18], которая представлена ниже. Следует также подчеркнуть, что в новой модели рассматривают как быстрые восстановительные процессы на клеточном уровне, так и регуляторные процессы на уровне организма с подключением функциональных резервов. При этом рассматривается снижение эффективности радиационного воздействия только в отношении рисков развития ближайших в процессе длительных полетов эффектов в быстро обновляющихся радиочувствительных тканях, влияющих на работоспособность космонавтов и характеризующих устойчивость организма к последующим радиационным воздействиям.

Пока в литературе нет прямых данных по снижению рисков отдаленных неблагоприятных эффектов в различных тканях за счет восстановительных процессов, необходимых для расчетов значений обобщенных доз H_O и установления значений коэффициентов KB_O . Однако рассмотренные нами выше данные об отсутствии сокращения продолжительности жизни животных при их облучении с малыми мощностями доз в течение жизни и даже наблюдаемый порой стимулирующий эффект гормезиса [11], когда в отдельных экспериментах авторы отмечали увеличение ПЖ у облучаемых животных по сравнению с контролем, позволяют надеяться, что быстрые процессы

восстановления на клеточном уровне в радиочувствительных тканях способствуют меньшему напряжению регуляторных систем и сохранению в значительной степени функциональных резервов организма. Ниже при рассмотрении результатов уникального 16-летнего «Хронического эксперимента», проведенного в ИМБП Минздрава СССР на собаках, получено некоторое подтверждение высказанному предположению. Это подтверждает, что учет быстрых восстановительных процессов на клеточном уровне в радиочувствительных тканях при радиационных воздействиях с очень малой мощностью дозы может в значительной степени способствовать снижению эффективности такого воздействия не только в отношении рисков ближайших эффектов в процессе длительных полетов, но также и отдаленных неблагоприятных последствий.

Для учета снижения эффективности радиационного воздействия из-за значительного глубинного перепада доз по телу, который, в частности, имеет место при воздействии протонов СКЛ и протонов РПЗ [17, 19, 20], а также приведения неравномерного облучения к условиям стандартного острого кратковременного, равномерного радиационного воздействия, разработан нормативный документ ГОСТ 25645.219-90 «Модель учета влияния пространственной неравномерности радиационного воздействия на обобщенный радиобиологический эффект» [33]. Этот документ непосредственно предназначен для использования при обосновании значения коэффициента $KР_Б$ для расчета обобщенной дозы $H_Б$ и риска ближайших неблагоприятных эффектов в процессе полета, но отчасти также применим для оценки значений коэффициентов $KР_О$, когда рассчитывается СРР после осуществления длительных межпланетных полетов.

В период 50–80 гг. проведен также большой объем исследований и обобщены экспериментальные данные по сочетанному действию радиации, а также вибрации, перегрузок, невосомости, гипоксии, гипокинезии и других физических и бытовых факторов в космических полетах [7, 10, 17, 18, 34, 35]. Они были направлены на обоснование коэффициента модификации $KМ_Б$ ближайшего радиационного ответа организма, касающегося снижения работоспособности человека и его радиационной устойчивости к возможным повторным радиационным воздействиям в результате нарушений в кроветворной системе, коже и ряде других ра-

диочувствительных тканей. Анализ проведенных исследований показал, что в основном после предварительного действия нерадиационного фактора при последующем облучении радиорезистентность организма повышается, и значения коэффициента $KМ_Б$ в дозовом выражении оценивалось в диапазоне 0,8–0,9. Обратная реакция усиления радиационного ответа организма наблюдалось при длительном действии жесткой гипокинезии или повышенной температуры до 42°C, а также когда дополнительный стрессовый нерадиационный фактор применяли после облучения (значение $KМ_Б$ достигало 1,3).

Как показано во введении, при разработке первых нормативов по радиационной безопасности применительно к кратковременным 30-суточным орбитальным и межпланетным полетам, радиобиологи и гигиенисты принимали в качестве основной опасности воздействие протонов СКЛ при развитии мощных СПС. Поэтому при первых расчетах радиационного риска в процессе осуществления полетов на Марс длительностью 3 года, тем более в качестве основного источника опасности рассматривали протоны СКЛ во время мощных вспышек на Солнце. В алгоритмах расчетов радиационного риска использовали вероятностную модель СПС в зависимости от плотности потока протонов на основе 19–20 солнечных циклов, а также обязательное наличие различных материалов и толщин защиты для радиационных убежищ. Принимали тогда только ближайшие эффекты после воздействия протонов СКЛ и рассматривали возможную глубину поражения в системе кроветворения после каждого СПС. Для разыгрываемой серии солнечных вспышек проводили оценки возможного риска смертности. Предварительно для мужчин различного возраста 25–55 лет были обоснованы кривые выживаемости и смертности в зависимости от дозы [5–10, 12, 13, 15–18]. В расчетах значение коэффициента модификации радиационного ответа $KМ_Б$ за счет действия нерадиационных факторов в процессе полета принимали равным 1,0. Значительно больше синергическое действие факторов полета проявилось позже в отношении очень важных для здоровья космонавтов отдаленных последствий, связанных с нарушениями сосудистого тонуса, повышением частоты сердечно-сосудистых заболеваний, рисками развития инфарктов и инсультов, с недостаточностью мозгового кровообращения и

когнитивных нарушений. Это будет рассмотрено ниже.

Исследования по определению коэффициентов ОБЭ воздействия протонов в широком диапазоне энергий

В первых нормативных документах по радиационной безопасности орбитальных полетов, а также полетов к Луне длительностью до 30 суток, радиобиологи и гигиенисты СССР и США на астронавтических конгрессах 1964–1965 гг. [5, 6, 17, 18, 21, 22] пришли к единодушному заключению, что ведущей опасностью для космонавтов (астронавтов) является воздействие протонов СКЛ во время развития мощных СПС, поскольку они происходят стохастически и их трудно прогнозировать. Исследования по изучению биоэффектов при воздействии протонов высоких энергий и ускоренных многозарядных ионов, с целью установления зависимости коэффициентов ОБЭ этих излучений от ЛПЭ, проводились в ИМБП Минздрава СССР, а также сотрудниками Института биофизики Минздрава СССР и ГНИИИ АиКМ МО СССР в тесном сотрудничестве с радиобиологической лабораторией ОИЯИ в г. Дубне. Эксперименты с облучениями протонами высоких энергий проводились на синхротроне в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и были связаны с необходимостью решения проблемы радиационной безопасности пилотируемых космических полетов. Опыты были поставлены как на мелких лабораторных животных мыши, крысы, так и на крупных млекопитающих (кролики, собаки). Кроме того, в экспериментах были и другие биообъекты: культуры клеток, бактерии, дрожжи, растительные объекты. Исследовали состояние различных систем у животных и их жизнеспособность после однократных и повторных облучений протонами с различными энергиями от 50 до 660 МэВ в широком диапазоне доз – от 0,25 до 8 Гр.

Были использованы различные критерии для оценки биологического действия протонов высоких энергий и определения коэффициента ОБЭ этого вида излучения. Детально характеризовали клиническую картину развития лучевой патологии и отдаленные последствия, используя функциональные, биохимические, морфологические и цитогенетические методы. Определяли выживаемость животных в раз-

личные сроки. Было уделено особое внимание системе гемопоза, коже, эпителию хрусталика глаза. Результаты этих системных исследований широкого спектра были обобщены в целом ряде монографий, профилированных сборников [8, 10, 17, 18, 36–38], а также докторских и большом числе кандидатских диссертаций.

В указанных выше обобщающих работах и защищенных диссертаций показано, что коэффициент ОБЭ для протонов с энергией 50–660 МэВ может быть принят равным 1. При наличии вклада протонов с более мягким спектром энергии (в спектре РПЗ) коэффициент ОБЭ может быть выше на 30–40 %. При воздействии протонов с очень высокой энергией в пределах 1–9 ГэВ также получены значения коэффициентов ОБЭ в диапазоне 1,5–2,0. Морфологические исследования нарушений в структурах коры головного мозга и материалы по отдаленным последствиям воздействия гамма-излучения, протонов и ускоренных ионов отражены в монографии [38]. Полученные результаты этих многолетних исследований позволили сделать ряд основных выводов, важных для оценки опасности СКЛ при осуществлении пилотируемых космических полетов, для разработки соответствующих стандартов для космонавтов, для службы радиационной безопасности.

Обобщенный вывод заключался в следующем. Влияние протонов исследуемых энергий (50–660 МэВ) на развитие лучевой патологии во все наблюдаемые периоды, включая отдаленные эффекты, не имело статистически значимых различий по сравнению с гамма-излучением. Количественная и качественная тождественность в развитии лучевых реакций на воздействие протонов и стандартных видов излучений, наблюдаемая на уровне целостного организма млекопитающих, а также на тканевом, субклеточном и молекулярном уровнях, позволило считать, что установленный коэффициент ОБЭ, равный единице, применим в случае облучения человека, в том числе и при космических полетах.

На основании этого можно заключить, что все отмеченные выше экспериментальные результаты, математические модели эффективной остаточной дозы и закономерности по формированию радиационного поражения с учетом восстановительных процессов на клеточном и организменном уровнях, полученные при действии гамма-излучений, можно непо-

средственно применять и при действии быстрых протонов.

Разработка новой модели эффективной остаточной дозы, учитывающей быстрые восстановительные процессы на клеточном уровне и компенсаторные процессы на уровне организма

Как было показано во введении, при обзоре большой экспериментальной базы радиобиологических исследований к 1975 г. вышло значительное число опубликованных монографий с подробным анализом результатов этих экспериментов. Много из них были посвящены исследованию закономерностей формирования радиационного поражения в быстро обновляющихся радиочувствительных тканях при сложном характере распределения дозы во времени с учетом восстановительных процессов на уровне организма. Часто целью этих исследований были расчеты эффективных остаточных доз, по аналогии с моделью Х. Блэра [1–10, 12, 13, 16–18], и определение коэффициентов эффективности рассматриваемого радиационного воздействия (коэффициентов времени KB_{γ}). Проводили анализ развития поражения и скорости последующего восстановления концентрации клеток отдельных радиочувствительных систем, особенно в системе кроветворения, а также оценивали количественно изменение устойчивости организма по мере приближения к величинам среднелетальных доз. При подробном анализе этих работ было обращено особое внимание на то, что скорость восстановления на клеточном уровне в быстро обновляющихся радиочувствительных тканях: в кроветворной системе, коже, эпителии ЖКТ и хрусталика глаза почти на порядок превышает скорость восстановления на уровне организма за счет реализации с некоторой задержкой регуляторных систем организма с подключением его функциональных резервов [16–18].

Поэтому при разработке новой модели эффективной остаточной дозы было предположено, что быстро протекающие восстановительные процессы на клеточном уровне, с характерным временем проявления от нескольких десятков часов и менее, необходимо учитывать введением коэффициента, зависящего от мощности дозы $K(\gamma)$. Данный коэффициент

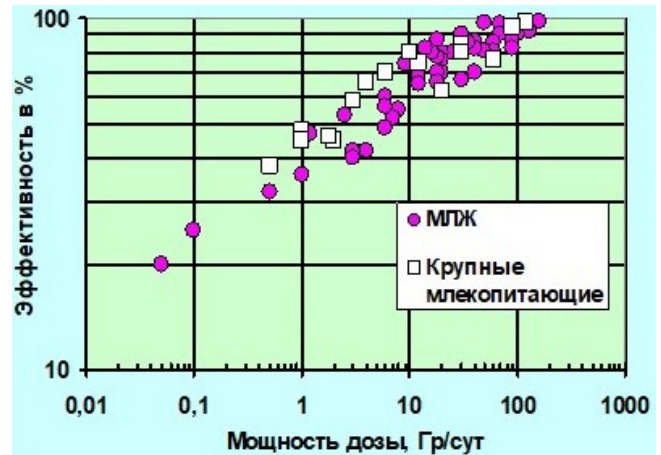


Рис. 1. Зависимость коэффициента эффективности радиационного воздействия $KB=K(\gamma)$ от мощности дозы при непрерывном облучении при $t \leq \tau$

определяет снижение эффективности непрерывного протяженного воздействия за счет быстрой компоненты восстановления. В начальный период облучения для малых длительностей $t \leq \tau$, когда не проявились еще регуляторные процессы организма с подключением его функциональных резервов для компенсации возникающих нарушений, характер накопления эффективной дозы можно описать простым соотношением:

$$dD_{\text{эф}}/dt = K(\gamma)\gamma(t). \quad (6)$$

Зависимость коэффициента эффективности радиационного воздействия $K(\gamma)$ от мощности дозы в широком диапазоне ее изменения (10^{-2} – 10^3 Гр·сут $^{-1}$) для излучений с низким значением ЛПЭ ($\leq 3,5$ кэВ·мкм $^{-1}$) представлена на рис. 1.

Для этой цели использовали значения коэффициента $K(\gamma)$, полученные на основе экспериментов по непрерывному облучению МЛЖ и крупных млекопитающих. Каждая точка на графике отражает проведение отдельного эксперимента на сравнительно большом количестве животных. Анализ данных, представленных на рис. 1, как обобщение литературных материалов [8–10, 12, 13, 16–18], показывает, что при облучении меньше часа, с мощностью дозы 140 Гр/сут (100 мГр/мин) и на порядок выше, среднелетальные дозы LD_{50} не изменяются. Для МЛЖ они составляют 8–8,5 Гр, а для крупных млекопитающих 2,5–4,0 Гр, свидетельствуя, что восстановительные процессы на уровне организма, оцениваемые по изменению среднелетальных доз $LD_{50/30}$ и $LD_{50/60}$ в пределах

костномозгового синдрома, не проявляются. В этом случае такие облучения могут рассматриваться как стандартные острые кратковременные радиационные воздействия, и значение коэффициента эффективности радиационного воздействия КВ максимально и равно 1,0 (на рис. 1–100 %). При снижении мощности дозы и увеличении длительности облучения до 5–10 сут, значения среднелетальных доз увеличиваются в разы, и коэффициент эффективности радиационного воздействия, равный отношению среднелетальных доз при стандартном остром кратковременном радиационном воздействии и рассматриваемом протяженном облучении, $KB=K(\gamma)$ снижается вместе с мощностью дозы по степенному закону $K(\gamma)=(\gamma/\gamma_r)^{0,18}$, где мощность дозы γ существенно меньше граничного значения $\gamma_r=140$ Гр/сут).

При этом следует отметить, что размах варьирования значений коэффициентов $K(\gamma)$, рассчитанных по результатам отдельных представленных в литературе экспериментов для каждого вида животных, существенно превышает межвидовые различия, что позволяет высказать предположение о возможности использования представленной зависимости $K(\gamma)$ от мощности дозы для расчетов эффективных доз применительно к человеку. Однако при решении задач радиационной безопасности следует выбирать, тем не менее, максимальную верхнюю оценку коэффициента $K(\gamma)$, соответствующую значениям для крупных млекопитающих. Для этого необходимо использовать верхнюю огибающую кривую, представленную на рис. 1, которой соответствует пороговое граничное значение мощности дозы $\gamma_r=40$ Гр/сут (28 мГр/мин). Поскольку коэффициент ОБЭ и значение КК для гамма-излучений ^{60}Co и ^{137}Cs принимается равным 1,0, то можно считать, граничное значение $\gamma_r=40$ Зв/сут.

Ранее нами были рассмотрены и проанализированы результаты облучений биологических объектов при длительности, не превышающей 5–10 сут, когда еще не подключены компенсаторные процессы со стороны организма, приводящие к усилению интенсивности пролиферативных процессов в тканях с целью восстановления нормальной концентрации их клеток. При дальнейшем увеличении длительности облучения и снижении мощности дозы эффективность радиационного поражения снижается еще более резко, о чем свидетельствуют данные, представленные в работах [6,

16–18]. Было показано, что коэффициент эффективности КВ при более протяженном облучении может снижаться в 10 и более раз. Он обусловлен как быстрыми процессами восстановления на клеточном уровне, так и более медленными процессами восстановления на уровне организма. С учетом не только восстановительных процессов на уровне организма, но также быстрых процессов восстановления на клеточном уровне была проведена разработка новой модели формирования поражения организма при протяженных воздействиях ионизирующих излучений (новой модели эффективной остаточной дозы). При этом были сделаны следующие предположения:

1. В начальном периоде протяженного облучения быстро протекающие восстановительные процессы на клеточном уровне с характерным временем проявления от нескольких десятков часов и менее учитываются введением коэффициента, зависящего от мощности дозы $K(\gamma)$. Данный коэффициент определяет снижение эффективности непрерывного протяженного воздействия за счет данной быстрой компоненты восстановления. В этот период для $t \leq \tau$ характер накопления эффективной дозы можно описать уравнением (6).
2. Медленная компонента восстановительных и компенсаторных процессов на уровне организма с характерным временем проявления от нескольких суток, недель и даже месяцев (различные физиологические системы организма) включается через некоторое время τ от начала облучения, связанное с реализацией обратной связи в рассматриваемой критической системе организма. Поэтому при дальнейшем облучении при $t > \tau$ сохраняется тот же закон накопления поражения (6), но добавляется восстановление поражения на уровне организма, которое происходит со скоростью, пропорциональной некоторому компенсаторно-восстановительному потенциалу организма $\beta(\gamma, t)$, зависящему от относительного изменения общего объема компенсаторных резервов организма в процессе длительного облучения $Q(\gamma, t)$, и величины поражения $D_{эф}(t-\tau)$ на момент времени $t-\tau$.

Результаты проведенного “Хронического эксперимента” по длительному 3–6-летнему облучению собак, моделирующему радиационные воздействия ГКЛ и СКЛ в условиях космического полета на Марс показали, что при облучении животных 4 и 5 групп в более высоких дозах

за год 120–188 сЗв в коре головного мозга, в системе гипоталамус – гипофиз – кора надпочечников, в других эндокринных органах через 2 года отмечается значительное снижение функциональной активности этих систем со временем в процессе протяженного облучения (материалы представлены в следующем разделе) [16–18]. Подобный характер изменений секреторной активности и морфологических изменений в органах и тканях свидетельствовал об ускорении процессов старения у экспериментальных животных.

В системах, осуществляющих регуляцию и компенсацию нарушенных функций в организме, при протяженных облучениях развивались гипофункциональные и морфологические изменения, свидетельствующие о снижении возможностей этих систем и, следовательно, об уменьшении компенсаторных резервов организма $Q(\gamma, t)$ с течением времени. Скорость данного процесса превышает скорость, обусловленную старением, в отсутствие радиационного фактора. Поэтому в отличие от модели Блэра, в которой постулировалось постоянство репаративных и компенсаторных возможностей организма (постоянство параметра β), в рассматриваемой новой модели предполагали неуклонное ослабление компенсаторно-восстановительного потенциала организма с возрастом в процессе старения, а также дополнительное снижение резервов организма в результате протяженного облучения.

Окончательно в дифференциальной форме выражение для накопления эффективной дозы в процессе протяженного облучения может быть записано в виде:

$$dD_{\text{эф}}/dt = K(\gamma)\gamma(t), \quad \text{для } t \leq \tau, \quad (7)$$

$$dD_{\text{эф}}/dt = K(\gamma)\gamma(t) - \beta_0 \exp[-(\lambda_0 + \lambda_p(\gamma, t))t] dD_{\text{эф}}(t - \tau) \quad \text{для } t > \tau,$$

где γ – мощность дозы, сЗв/сут; $K(\gamma)$ – зависящий от мощности дозы коэффициент эффективности протяженного радиационного воздействия, обусловленный реализацией быстрых процессов восстановления на клеточном уровне; τ – время задержки процессов восстановления на уровне организма;

β_0 , λ_0 , λ_p – экспериментально получаемые параметры, определяющие скорость процессов восстановления на уровне организма. Параметр λ_0 определяет снижение скорости восстановления поражения в организме за счет процессов старения, а функционал $\lambda_p(\gamma, t)$ характеризует радиационно-обусловленное снижение скорости

восстановления. Определение параметров в представленной выше модели эффективной дозы проводилось на основе согласования с экспериментальными данными большого числа экспериментов после острых и в процессе хронического облучения различных животных.

Экспериментальные факты увеличения периода полувосстановления поражения в системе кроветворения и на уровне организма по мере увеличения поглощенной дозы неоднократно отмечались и обсуждались в литературе [7–10, 12, 16–18, 39]. Проведенный анализ в отношении параметров скорости восстановления на уровне организма у различных животных после острых и в процессе хронических облучений показал в то же время, что при облучении в относительно невысоких дозах 1 Гр (предел дозы за карьеру космонавтов), значение периода полувосстановления поражения $T_{1/2}$ у мелких лабораторных животных мало изменяется и составляет 10 ± 2 сут, а параметр $\beta_0 = 0,693/T_{1/2}$ равен $0,07 \text{ сут}^{-1}$. Для крупных млекопитающих и для человека значение периода $T_{1/2}$ оказывается равным 35 ± 10 сут, а параметр $\beta_0 = 0,02 \text{ сут}^{-1}$. В случаях облучения в более высоких уровнях доз скорость восстановления на уровне организма снижается, а период полувосстановления $T_{1/2}$ увеличивается по экспоненциальному закону в соответствии с уравнением:

$$\beta = \beta_0 \exp(-0,0009D),$$

где D – поглощенная доза, сГр.

Для решения вопросов радиационной безопасности космических полетов важно отметить, что при воздействии протонов СКЛ, в случае развития мощных СПС с большими потоками протонов и высокой их энергией до 100 МэВ, среднетканевые дозы ослабляются в 10–50 раз защитой космической станции или межпланетного корабля. При развитии СПС в течение 1–2 сут с относительно малой мощностью дозы, следует учитывать, что эффективность облучения и эффективные остаточные дозы от протонов СКЛ снижаются дополнительно в 4–10 раз в соответствии с новой моделью (уравнение (7) и согласно данным, представленным на рис. 1. Это снижение зависит только от мощности дозы.

В случае оценки радиационной опасности от протонов РПЗ при длительных облучениях, эффективность радиационного воздействия снижается значительно сильнее, и она зависит как от мощности дозы, так и от длительности облучения. Действительно, при длительных орбиталь-

ных полетах до половины года или года с постоянной малой мощностью дозы, значение эффективной остаточной дозы определяется на основе следующего уравнения:

$$D_{\text{эф}} = (K(\gamma)\gamma/\beta_0)[1 - \exp(-\beta_0 t)]. \quad (9)$$

Легко можно рассчитать коэффициент времени (KB) – эффективности данного радиационного воздействия с учетом восстановительных процессов путем отношения $D_{\text{эф}}$ к суммарной накопленной дозе, равной γt . Значение коэффициента KB в этом случае может быть установлено на основе уравнения:

$$KB = K(\gamma)[1 - \exp(-\beta_0 t)]/\beta_0 t. \quad (10)$$

Как показано в работах [16–18], с помощью новой модели эффективной остаточной дозы удалось достаточно хорошо спрогнозировать длительность облучения для достижения 50 % гибели МЛЖ и больших млекопитающих с различными ежедневными фракционированными острыми радиационными воздействиями или непрерывными облучениями с различной мощностью дозы в широком диапазоне ее изменения.

Представленные выше расчетные значения коэффициентов времени $KB_{\text{в}}$ применительно к ближайшим радиационным эффектам – к формированию поражения радиочувствительных тканей, риску развития ПЛР средней степени тяжести и нарушению работоспособности космонавтов в процессе длительных орбитальных и межпланетных – входят непосредственно в выражение (4) для обобщенной дозы $H_{\text{в}}$. Они могут непосредственно использоваться для расчетов кратности снижения эффективности воздействия протонов СКЛ и РПЗ и опасности для космонавтов при развитии мощных СПС при осуществлении орбитальных или межпланетных полетов и их нахождении за конкретной физической защитой в космическом аппарате или на орбитальной станции (в соответствии с уравнением (10)).

В результате разработанной новой модели эффективной остаточной дозы и при учете быстрых восстановительных процессов на клеточном уровне в радиочувствительных быстро обновляющихся тканях, при воздействии гамма-излучения или протонов СКЛ с очень малыми значениями мощностей доз, показано снижение эффективности таких радиационных воздействий в 4–8 раз [40]. При этом в течение 19–24 солнечных циклов показано, что эффективные остаточные среднетканевые и обобщенные дозы от СКЛ существенно ниже нормативных значе-

ний для орбитальных полетов [26, 28, 40]. Кроме того, при воздействии протонов СКЛ с относительно малой жесткостью спектра 50–80 МэВ будет наблюдаться значительный перепад доз по телу космонавтов в пределах 3–5 раз, что также приведет в соответствии с нормативным документом [33] к снижению эффективности их воздействия по крайней мере в 2–3 раза. Таким образом, в отношении радиационной безопасности орбитальных космических полетов имеется значительная надежность в ее обеспечении за весь период наблюдений.

Экспериментальные исследования и расчеты к обоснованию дозовых нагрузок и величин суммарного радиационного риска для космонавтов в течение их жизни после осуществления 3-летней экспедиции на Марс

Для обеспечения радиационной безопасности космических полетов и решения вопросов радиационного нормирования применительно к полету на Марс, наряду с рассмотренными выше проведенными обширными исследованиями, необходимо обратиться также к материалам уникального 16-летнего “Хронического эксперимента”. Этот эксперимент был проведен с 1964 по 1980 гг. Он был поставлен на 250 собаках по 3- и 6-летнему их гамма-облучению, моделирующему по эквивалентной среднетканевой дозе и временному режиму воздействие ГКЛ и СКЛ при межпланетном полете на Марс. В нем принимали участие коллективы нескольких институтов СССР: Института медико-биологических проблем Минздрава СССР, Института биофизики Минздрава СССР (в настоящее время ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА) в Москве, Центрального научно-исследовательского рентгенорадиологического института в Санкт -Петербурге, а также ученые биологи и медики стран членов СЭВ: Польши, ГДР, Чехословакии. Его результаты освещались в журнале “Советский Союз” и были представлены на Выставке достижений народного хозяйства в павильоне “Космос” [16–18].

Основная задача данного эксперимента состояла в том, чтобы по результатам клинических, физиологических, гематологических, иммунологических, морфологических и ряда других исследований получить данные о пороговых уровнях лучевого воздействия, об изменении функцио-

Таблица 1

Среднетканевые дозы за год, получаемые собаками разных групп в “Хроническом эксперименте”, мЗв, и в скобках мощности среднетканевой дозы, мЗв/сут

Группа	1	2	3	4	5
Среднетканевые дозы при хроническом облучении за год	210 (0,576)	620 (1,7)	1250 (3,4)	620 (1,7)	620 (1,7)
Среднетканевые дозы трех суточных облучений	–	–	–	420+80+80	420+420+420
Суммарные среднетканевые дозы за год	210 (0,576)	620 (1,7)	1250 (3,4)	1200	1880

нального состояния организма собак во время длительного (до 6 лет) хронического их облучения. Кроме того, необходимо было исследовать возможные отдаленные последствия радиационных воздействий на протяжении всей последующей жизни подопытных собак. В процессе многолетнего облучения и после его окончания у собак исследовали общий клинический статус, изучали обмен веществ на основе биохимического анализа крови и тканей, проводили морфологические и цитокинетические исследования гемопоэтической ткани, определяли состояние высшей нервной деятельности, сердечно-сосудистой системы в обычных условиях и при использовании функциональных нагрузок, оценивали состояние вестибулярного анализатора, изучали сперматогенную функцию и способность производить потомство, проводили гистологические исследования различных органов и тканей и ряд других специальных исследований. Наблюдение за животными осуществляли в течение 14 лет.

Животных содержали на открытых площадках в специальных круговых вольерах, разделенных на 6 секторов каждый. Хроническое облучение собак, моделирующее по дозовым нагрузкам и характеру временного распределения доз воздействие ГКЛ, проводили непрерывно по 22 часа в сутки с помощью укрепленных над вольерами гамма-облучательских установок “Люстра” с источниками излучения ^{60}Co .

Кроме исследования дозных полей, были проведены фантомные измерения поглощенных доз в различных органах собак с использованием гетерогенного костно-парафинового фантома с моделированием легких. У каждой опытной собаки на шее находились индивидуальные термолюминесцентные дозиметры. Дозиметрию на гамма-облучательских установках и индивидуальную дозиметрию осуществляли в течение всего 6-летнего периода облучения собак. Максимальные поверхностные эквивалентные дозы у животных 1, 2 и 3-ей групп составляли 250, 750 и 1500 мЗв/год, а среднетканевые – 210, 620 и

1250 мЗв/год. Собак 4 и 5-й-ой групп, кроме хронического облучения в дозе 620 мЗв в год, подвергали дополнительно трем суточным облучениям за год с интервалом 4 мес, в дозах (420, 80 и 800 мЗв для собак 4 группы и 420, 420, и 420 мЗв для животных 5 группы).

Суточные облучения, моделирующие воздействие СКЛ во время развития мощных СПС, проводили на гамма-облучательской установке “Кобальт”. Таким образом, суммарные среднетканевые дозы за год в 4-ой группе составили 1,20 Зв, а в 5 группе – 1,88 Зв. Контрольная 6-ая группа собак (без облучения) содержалась на той же самой площадке, в таких же вольерах и климатических условиях в течение 14 лет (времени проведения эксперимента).

В табл. 1 представлены данные по дозовым нагрузкам у животных пяти облучаемых групп.

У собак контрольной, а также первой и второй групп при облучении с очень низкими значениями мощностей доз, сохранялся хороший уровень здоровья и физической работоспособности, отмечали нормальное их самочувствие в течение трех- и шестилетнего облучения и после его окончания. Сохранялся также суммарный уровень функциональных резервов организма, о чем свидетельствовало сохранение высокой скорости восстановления различных показателей системы кроветворения и сперматогенеза после выведения части животных из облучения через 3 года. Важно отметить при этом, что продолжительность жизни собак 1-ой группы после накопления суммарных доз 1,26 Зв, а также собак 2-ой группы при суммарных дозах за 3 года 1,86 Зв не отличалась от продолжительности жизни контрольных животных. Этот означает, что за счет быстрых восстановительных процессов на клеточном уровне в быстро обновляющихся радиочувствительных тканях, за счет осуществления быстрых восстановительных процессов на клеточном уровне, существенно снижается

эффективная остаточная доза. Имеет место нормальная физиологическая адаптация, и для компенсации возможных нарушений не происходит дополнительного активного подключения регуляторных систем на уровне организма, сохраняются его функциональные резервы и продолжительность жизни не изменяется, хотя эти суммарные дозы превышают существующий в настоящее время предел дозы для космонавтов за их карьеру.

При 6-летнем облучении собак 2-ой группы и трехлетнем облучении собак 3 и 4-ой групп суммарные дозы составили соответственно 3,72 Зв; 3,75 Зв и 3,60 Зв. Они соответствовали пределу дозы за карьеру космонавтов 4,00 Зв, вплоть до 1985 г. [41]. В "Хроническом эксперименте" было зарегистрировано для этих групп животных сокращение продолжительности жизни на 5 %, что, конечно, недопустимо, и в последующих нормативных документах по радиационной безопасности космических полетов предел дозы за карьеру космонавтов в России был снижен в 4 раза до 1,00 Зв, как в атомной промышленности [26–28]. Вероятно, при нескольких больших мощностях доз и увеличении длительности облучения, возрастают значения эффективной остаточной дозы, имеет место уже активная адаптация, характеризующаяся выраженным напряжением регуляторных систем и сокращением функциональных резервов. Это обуславливает ускоренное старение и сокращение продолжительности жизни [42].

При более высоких уровнях радиационного воздействия у собак в 4 и 5-ой группах отмечали очень глубокие и выраженные изменения в различных системах организма с существенным снижением скорости восстановления на уровне организма показателей, как в системе кроветворения, так и в системе сперматогенеза после выведения части собак после 3 лет облучения. Гистологические исследования внутренних органов в 4 и 5-ой группах показали, что через 2 года от начала облучения, после первоначальной активации адаптационных процессов и значительного напряжения регуляторных систем, наблюдали выраженные морфологические изменения в коре головного мозга, нарушения в гипоталамусе, гипофизе, нейроэндокринной регуляции, резкое снижение гормональной активности со стороны надпочечников, щитовидной, половой желез и др. Несколько позже отмечали нарушения в системе кровообращения, обусловленные в частности склеротическими изменениями сосудов сердца, легких, печени, и почек, что наруша-

ло кровообращение ведущих органов и систем. Выявлены нарушения терморегуляции и выраженное снижение физической работоспособности собак. Состояние животных этих групп можно характеризовать, как неудовлетворительная адаптация, сопровождаемая резко выраженным перенапряжением регуляторных систем, что увеличивает вероятность срыва адаптации при дополнительных нагрузках. Имело место экспоненциальное снижение суммарного объема функциональных резервов организма с увеличением длительности облучения и суммарной дозы, а также экспоненциальное увеличение возрастных коэффициентов смертности животных. Все это свидетельствовало о значительном ускорении процессов старения животных, что подтвердили данные о более сильном на 18 и 30 % сокращении продолжительности жизни у собак 4 и 5-ой групп [16–18, 42].

На основе этих материалов была разработана модель скорости радиационно-индуцированной смертности млекопитающих, описывающая возрастные изменения коэффициентов смертности при острых облучениях в различных дозах и ускоренное старение животных при хронических облучениях [16–18, 27, 43, 44]. Эта модель проверенная по результатам облучения большого числа МЛЖ, а также в экспериментах по острому и хроническому облучению собак, позволила установить закономерности в отношении относительного изменения продолжительности жизни МЛЖ и крупных млекопитающих от мощности дозы и дозы в широком диапазоне их изменения. Кроме того, она позволила установить также скорость ее снижения в зависимости от интенсивности включения регуляторных систем, степени снижения функциональных резервов организма при развитии сначала костномозгового синдрома, затем желудочно-кишечного и, наконец, поражения центральной нервной системы по мере увеличения мощности дозы [16, 17].

С использованием этой модели, демографических данных об изменении коэффициентов смертности от возраста мужского населения нашей страны в периоде до 1990 г, был разработан алгоритм и проведены расчеты суммарного радиационного риска (СРР) и сокращения средней предстоящей продолжительности жизни (СППЖ) для космонавтов различного возраста от 25 до 55 лет, если бы они совершили полет на Марс в период максимума СА в течение 2–3 лет при различной толщине защиты радиационного убежища (X_{py}) и бытовых от-

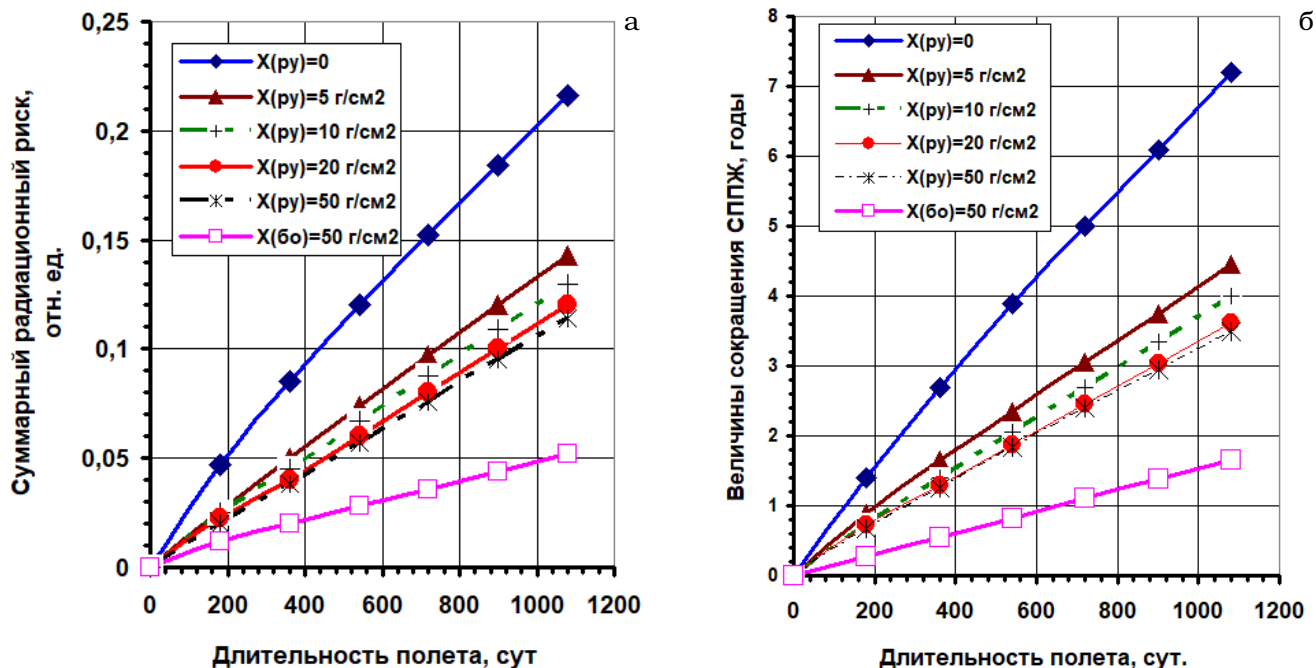


Рис. 2. а – суммарный радиационный риск в течение жизни космонавтов; б – сокращение СППЖ космонавтов после завершения межпланетного полета на Марс различной длительности в период максимума СА за различными толщинами защиты радиационного убежища X_{py} из алюминия при гипотетически минимальной толщине защиты бытовых отсеков $X_{bo}=1 \text{ г/см}^2$ алюминия, а также при избыточной толщине $X_{bo}=50 \text{ г/см}^2$

секов (X_{bo}) КА в $\text{г}\cdot\text{см}^2$ алюминия [17, 18, 27, 43, 44]. На рис. 2 представлены расчетные значения СРР и сокращения СППЖ для космонавтов после завершения межпланетного полета к Марсу, проводимого в период максимума 22 цикла СА в зависимости от длительности полета и толщины радиационного убежища (РУ) из алюминия в $\text{г}\cdot\text{см}^2$. Верхняя расчетная кривая соответствует предположению о гипотетической минимальной толщине бытовых отсеков космического корабля $X_{bo}=1 \text{ г}\cdot\text{см}^2$. При этом как бы отсутствует специальное радиационное убежище $X_{py}=0$. При возможности его организации РУ и с увеличением толщины его защиты, СРР в течение жизни, как и возможное сокращение СППЖ, значительно снижаются.

При более вероятном 2-летнем полете на Марс максимальное значение СРР равно 15 %, а сокращение СППЖ – 5 лет. При толщине X_{py} , равной $5 \text{ г}\cdot\text{см}^2$ эти величины уже резко снижаются до 9,5 % и 3 года. Дальнейшее значительное увеличение толщины (X_{py}) до $10 \text{ г}\cdot\text{см}^2$; $20 \text{ г}\cdot\text{см}^2$ и даже $50 \text{ г}\cdot\text{см}^2$ не приводит к существенному снижению указанных радиационных рисков при предполагаемой минимальной конструкционной защите КА $X_{bo}=1 \text{ г}\cdot\text{см}^2$. Ве-

личины СРР снижаются очень незначительно до 8,5 ; 8,0 и 7,5 % соответственно, а сокращение СППЖ – до 2,6; 2,4 и 2,3 года.

Это означает, что толщина РУ до $10 \text{ г}\cdot\text{см}^2$ уже почти полностью обеспечивает защиту от протонов СКЛ, а для ослабления эквивалентных доз от ГКЛ требуется серьезное увеличение толщины конструкционной защиты бытовых отсеков КА. Так при толщине защиты $X_{bo}=50 \text{ г}\cdot\text{см}^2$ алюминия расчетное значение СРР снижается до 3,5 % при сокращении СППЖ до 1,2 года. Однако в этом гипотетическом случае резко увеличится вес космического аппарата,

На рис. 3 представлены значения СРР при 2-летнем полете на Марс в период максимума СА за защитой КА равной $30 \text{ г}\cdot\text{см}^2$, а также риска развития опухолей в зависимости от возраста космонавтов на начало межпланетного полета. Для канцерогенного риска представлены максимальная и минимальная оценки, без учета и с учетом коэффициента редукции дозы, учитывающего снижение эффективности радиационного воздействия при малых значениях мощности дозы [17, 18, 43, 44].

Как видно из данных, представленных на рисунке, СРР для космонавтов в результате всех причин гибели в течение всей жизни (к 70 го-

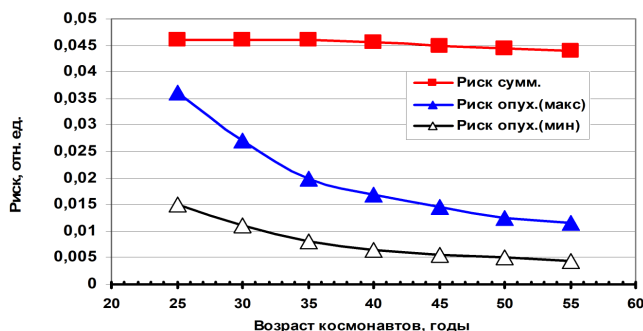


Рис. 3. Суммарный радиационный риск и риск развития опухолей в течение жизни для космонавтов различного возраста после завершения 2-годового межпланетного полета, осуществляемого в период максимума СА ($X_{\text{вс}}=30 \text{ г/см}^2$)

дам) существенно превышает риск развития опухолей, особенно для лиц старших возрастных групп. Риск развития опухолей для космонавтов, начинающих полет в возрасте 25 лет, составляет около трети от суммарного радиационного риска. В то же время для космонавтов, начинающих свою профессиональную деятельность в возрасте 45–55 лет, он почти 9 раз ниже. Суммарный радиационный риск в течение жизни почти в 20 раз превышает оценки радиационного риска в процессе полета. Он не зависит от возраста космонавтов и почти на порядок превышает риск развития опухолей для старших возрастных групп космонавтов.

Учитывая вышеуказанное, СРР в течение жизни космонавтов, а также возможное сокращение СППЖ являются наилучшими интегральными показателями для вопросов нормирования и для оценки опасности радиационного воздействия, которое имеет место в условиях длительных космических полетов.

В работах [17, 27, 43, 44] на основе разработанной модели скорости радиационно-индуцированной смертности млекопитающих и разработанного алгоритма расчета СРР в зависимости от суммарного значения обобщенных эквивалентных доз от космических излучений (см. уравнения (4) и (5)), были проведены эти расчеты СРР в течение жизни космонавтов России, а также астронавтов США и Японии после воздействия на них космических излучений в различных дозах. При этом для проведения расчетов функций дожития, обычно применяемых в эпидемиологии, использовали следующие возрастные зависимости коэффициентов смертности для космонавтов России и возрастов, превышающих 20 лет: $\mu(t)=\mu(0)\exp(\lambda_0 t)$, где $\mu(0)=9,0 \cdot 10^{-4}$;

$\lambda_0=0,062 \text{ 1/год}$, где $\mu(0)$ – экстраполированное к нулевому возрасту значение коэффициента смертности. Для американских астронавтов $\mu(0)=1,0 \cdot 10^{-4}$; $\lambda_0=0,0837 \text{ 1/год}$. Для японских астронавтов $\mu(0)=5,0 \cdot 10^{-5}$; $\lambda_0=0,0885 \text{ 1/год}$. Это данные были выбраны для мужского населения этих стран в соответствии со статистическими «Ежегодниками» в СССР 1980–1990 гг. Проведенная проверка возрастных коэффициентов смертности мужчин по данным Ежегодников России 1994–2000 гг.; 2001–2010 гг.; 2011–2016 гг. и 2017–2023 гг. показала, что характер нарастания коэффициентов смертности мужчин России сохранялся прежним, подчинялся экспоненциальному закону с сохранением параметра $\lambda_0=0,062 \text{ 1/год}$. Чуть уменьшилось экстраполированное к нулевому возрасту значение $\mu(0)=8,0 \cdot 10^{-4}$, что практически не сказалось на величинах СРР.

Расчеты показали, что суммарный радиационный риск в течение жизни космонавтов линейно зависит от величины обобщенной дозы H_0 и значение его при обобщенной дозе 1 Зв составляет 13 % для российских космонавтов, а также 11 и 12,5 % для японских и американских астронавтов. Эта зависимость представлена на рис. 4.

Следует отметить, что исследователи Колумбийского университета в работе [45] оценили, что суммарный радиационный риск в результате бомбардировок за счет канцерогенеза, а также дегенеративных изменений в коре головного мозга, нарушений в системе кровообращения, увеличения сердечно-сосудистых заболеваний и др. для жителей Хиросимы и Нагасаки равен 14 % на 1 Зв, что очень близко к представленным нами выше расчетным значениям.

Действительно, в различных эпидемиологических исследованиях появились свидетель-

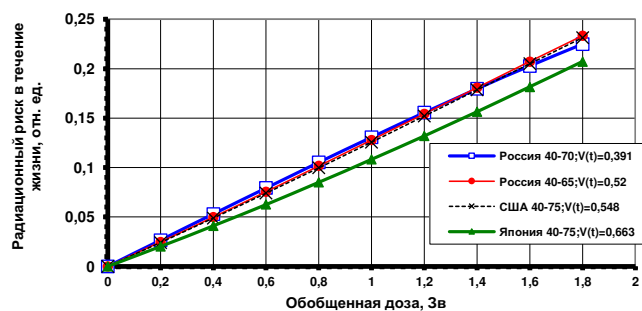


Рис. 4. Зависимость суммарного радиационного риска для космонавтов России, астронавтов США и Японии в возрасте 40 лет от величины обобщенной дозы

ства о развитии неопухоловой отдаленной патологии, связанной с различными нарушениями в системе кровообращения, в том числе недостаточностью мозгового кровообращения, увеличением частоты гипертонии, случаев инфарктов и инсультов. У лиц, пострадавших в Хиросиме и Нагасаки, эти проявления были обнаружены через 30–50 лет после бомбардировок. Увеличение заболеваемости со стороны ЦНС и сердечно-сосудистой системы, а также указанные выше нарушения наблюдали у работников п/о “Маяк” через 35–45 лет после начала их работы. Аналогичные проявления отмечены уже через 15 лет у ликвидаторов последствий аварии (ЛПА) на ЧАЭС, которые нарастали в последующие 10 лет [17, 18, 46, 47].

В последние годы в значительном числе лабораторий мира стали подробно изучать отдаленные радиационные последствия воздействия малых и средних уровней доз в пределах 0,5–1 Зв, связанные с сердечно-сосудистыми изменениями, недостаточностью мозгового кровообращения. В работе [47] представлены данные эпидемиологических исследований гигиенистов России и специалистов США, Европы, Японии, касающиеся установленных в этих странах рисков смертности от сердечно-сосудистых заболеваний, обусловленных радиационным фактором. Для нескольких многочисленных когорт рассмотрены эффекты тотального внешнего облучения суммарной дозой менее 0,5 Зв при мощностях дозы менее 1 сЗв/сут. В частности, специалистами Франции получено значение риска смертности от сердечно-сосудистых болезней $2,5 \pm 0,9$ % на 1 Зв. В пределах 95 % доверительного интервала эта величина изменяется от 0,8 до 4,2 %. Отечественными исследователями коэффициент радиационного риска от сердечно-сосудистых болезней для России оценивался равным 6–8,5 % на 1 Зв [47]. Коэффициент радиационного риска из-за канцерогенеза для мужчин России в возрастных группах от 30 до 50 лет равен 4,6 и 2,4 % соответственно. Таким образом, коэффициент суммарного пожизненного радиационного риска на 1 Зв от канцерогенеза, болезней ЦНС, сердечно-сосудистых и других болезней составит для этих возрастных групп 10,6 и 10,9 %.

Следует подчеркнуть, что данные оценки СРР на 1 Зв, полученные, с одной стороны, на основе анализа большого числа экспериментальных данных, представленных выше модельных представлений и проведенных расчетов, с точностью до 3 % совпали с оценка-

ми, представленными учеными эпидемиологами в результате многолетних исследований, – с другой стороны [17, 18, 27, 44, 45, 47].

На основе анализа новых литературных данных за последние 35 лет о значительно более высоких максимальных значениях коэффициентов ОБЭМ для ядер ГКЛ при малых поглощенных дозах 0,01–0,05 сГр, сотрудниками ИМБП РАН и ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА в 2021 г. обоснована и представлена новая зависимость KK_0 от ЛПЭ применительно к риску отдаленных неблагоприятных эффектов [48]. В случае ее утверждения в качестве нормативного документа, вместо используемых с 1990 г. по настоящее время нормативных документов Публикации 60 МКРЗ [31] и ГОСТ 25645 218-90 [32] расчетные значения эквивалентных среднетканевых и обобщенных доз от ГКЛ за год возрастут в 2,0 и 2,5 раза соответственно. Вместе с новыми, в 2 раза более высокими коэффициентами модификации KM_0 отдаленных радиационных эффектов, обоснованными в работе [49] за счет также воздействия в полете невесомости и химического загрязнения малого замкнутого воздушного объема космических кораблей или орбитальных станций, эквивалентные обобщенные дозы, величины СРР и сокращения СППЖ космонавтов возрастут в 4–5 раз и будут неприемлемо высокими. Практическая реализация длительных межпланетных полетов к Марсу в этих условиях становится проблематичной. Какие есть возможности снижения дозы от ГКЛ за год?

Выше нами были представлены данные о снижении эффективности радиационного воздействия протонов СКЛ при мощных СПС, а также протонов РПЗ за счет быстрых восстановительных процессов на клеточном уровне в радиочувствительных быстро обновляющихся тканях. Было показано, что воздействие протонов на космонавтов происходит за защитой КА с очень малыми значениями мощностей доз, что приводит к дополнительному снижению эффективности их воздействия в 4–8 раз. (см. рис. 1) [40].

Учитывая, что в составе ГКЛ протоны и ядра гелия по потоку составляют 99 % от всех ядер и определяют значительный вклад в суммарную среднетканевую дозу от ГКЛ за год, теперь нами сделана попытка оценить возможное снижение величин эквивалентных среднетканевых и обобщенных доз от ГКЛ за год, если учесть также быстрые восстановительные процессы на клеточном уровне в радиочувствительных быстро обновляющихся тканях при воздействии этих ядер. В работе [50] проведены

расчеты локальных тканевых доз за год от ГКЛ при полете КА вне магнитосферы Земли в период минимума СА за различными толщинами защиты КА. Было показано, что использование в расчетах, с одной стороны, новой зависимости КК от ЛПЭ и снижение эффективности воздействия с малой мощностью дозы протонов, ионов гелия и вторичных частиц, рождающихся в защите КА с $Z \leq 2$, – с другой, позволяет компенсировать повышение уровней доз от ГКЛ за год при малых толщинах защиты КА.

Учет также быстрых процессов, восстановления на клеточном уровне, по сравнению с прежними вариантами расчетов, приводит для толщин защиты 30–100 г·см⁻² алюминия к снижению в 2–3 раза годовых локальных тканевых эквивалентных доз от ГКЛ при полетах вне магнитосферы Земли, а в случае полиэтилена – в 2,8–4,0 раза. Имеет место большая кратность ослабления дозы с увеличением толщины защиты для выбранного нового варианта расчета. Это вполне компенсирует увеличение доз в 2–2,5 раза при использовании новой зависимости КК от ЛПЭ при малых толщинах защиты [50].

Таким образом, при расчетах обобщенных доз и суммарного радиационного риска в результате 2-летнего полета на Марс в период максимума СА следует учитывать только обоснованное недавно в работе [49] значение коэффициента модификации $KM_0=2,0$ радиационного ответа организма за счет других стрессовых факторов при длительных космических полетах. При защите космического аппарата, равной 30 г·см⁻² алюминия, СРР окажется равным 9 %, а сокращение СППЖ – 3 года (см. рис. 3). С учетом риска от предварительного годового орбитального полета 3,9 % и риска от рентгенологических процедур за карьеру 1,3 %, суммарный радиационный риск за карьеру космонавтов с учетом однократного полета на Марс оценивается равным 14,2 %, а сокращение СППЖ – 4,8 года. Это может рассматриваться уже приемлемым, поскольку, как показано в работе [20], на Земле есть значительный класс профессий и видов деятельности с аналогичными высокими рисками дополнительной смертности в течение жизни. Следует также учитывать, что вернувшиеся “Марсиане” будут героями населения всей Земли, они испытают чувство глубокого удовлетворения и гордости, у них значительно повысится качество последующей жизни. При этом ее продолжительность скорее всего не сократится, а может даже возрасти. Об этом свидетельствуют данные о СППЖ российских космо-

навтов и астронавтов США после завершения длительных орбитальных полетов [51], а также работы [44].

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований РАН № FMFR-2024-0036.

Список литературы

1. Блэр Х. Формулировка взаимосвязи между дозой облучения и сокращением продолжительности жизни. В кн.: Материалы международной конференции по мирному использованию атомной энергии. т. II. М., Медгиз, 1958, с. 147–149.
Blair H. Formulation of the relationship between radiation dose and reduction of life expectancy. - In the book: Proceedings of the international conference on the peaceful use of atomic energy. Vol. II. M. Medgiz, 1958, pp. 147-149.
2. Blair H.A. Some aspects properties of repairable and irreparable radiation injury. Some aspects of international irradiation. - Oxford: Pergamon Press, 1962, p. 147-150.
3. Blair H.A. The constancy of repair rate and irreparability during protracted exposure to ionizing radiation. - Ann. New York Acad. Sci., 1964, V. 114, part. 1, p. 150-157.
4. Дэвидсон Г.О. Биологические последствия общего гамма-облучения человека. М.: Атомиздат, 1960, 108 с.
Davidson G.O. Biological consequences of general gamma irradiation of man. Moscow: Atomizdat, 1960, 108 p.
5. Langham W. (ed.). Radiobiological Factors in Manned Space Flight. Nation. Acad. Sci., Nation. Res. Council, Washington, 1967.
6. Langham W.H., Brooks F.M., Grahm D. Radiation biology and Space environmental parameters in manned spacecraft design and operations. // Aerospace medicine, 1965, N 2, Section II, P.14-41
7. Саксанов П.П., Антипов В.В., Давыдов Б.И. Особенности биологического действия космической радиации. В кн.: Очерки космической радиобиологии. Проблемы космической биологии Т.IX. - М.: Наука, 1968, с. 196-226.
Saksanov P.P., Antipov V.V., Davydov B.I. Features of the biological effects of cosmic radiation. In the book: Essays on space radiobiology. Problems of space biology, Vol. IX. - Moscow: Nauka, 1968, pp. 196-226.

8. Даренская Н.Г., Кознова Л.Б., Акоев И.Г., Невская Г.Ф. Относительная биологическая эффективность излучений. Фактор времени облучения. М.: Атомиздат, 1968, 375 с.
Darenskaya N. G., Kosnova L. B., Akoev I. G., Nevskaya G. F. The relative biological effectiveness of radiations. The time factor exposure. - Moscow: Atomizdat, 1968, 375 p.
9. Акоев И.Г. Проблемы постлучевого восстановления. М.: Атомиздат, 1970, 368 с.
Akoev I.G. Problems of post-radiation recovery. М.: Atomizdat, 1970, 368 s.
10. Григорьев Ю.Г. Радиационная безопасность космических полетов. М.: Атомиздат, 1975, 254 с.
Grigoriev Y. G. Radiation safety of space flights. Moscow, Atomizdat, 1975, 254 p.
11. Кузин А.М. Стимулирующее действие ионизирующего излучения на биологические процессы. М.: Атомиздат, 1977.
Kuzin A.M. Stimulating effect of ionizing radiation on biological processes. Moscow: Atomizdat, 1977.
12. Бонд В., Флиднер Т., Аршамбо Д. Радиационная гибель млекопитающих М.: Атомиздат, 1971.
Bond V., Flidner T., Archambault D. Radiation death of mammals М., Atomizdat, 1971.
13. Сравнительная клеточная и видовая радиочувствительность. Под редакцией В. Бонда и Т. Сугахары. М.: Атомиздат, 1974.
Comparative Cellular and Species Radiosensitivity. Edited by V. Bond and T. Sugahara. Moscow: Atomizdat, 1974.
14. Гуськова А.К., Байсоголов Г.Д. Лучевая болезнь человека. М.: Медицина, 1971.
Guskova, A.K., Baysogolov, G.D. Human Radiation Disease. Moscow: Meditsina, 1971.
15. Ранние эффекты облучения человека высокими дозами ионизирующего излучения. Материал 37 сессии НКДАР ООН Вена 6-17 июня 1988 г.
Early effects of human exposure to high doses of ionizing radiation. Proceedings of the 37th session of UNSCEAR, Vienna, June 6-17, 1988.
16. Григорьев Ю.Г., Попов В.И., Шафиркин А.В., Антипенко Ж.Б. Соматические эффекты хронического гамма-облучения. М.: Энергоатомиздат, 1986.
Grigoriev Yu.G., Popov V.I., Shafirkin A.V., Antipenko Zh.B. Somatic effects of chronic gamma irradiation. Moscow: Energoatomizdat, 1986.
17. Шафиркин А.В., Григорьев Ю.Г. Межпланетные и орбитальные полеты. Радиационный риск для космонавтов (Радиобиологическое обоснование. М.: Экономика, 2009, 639 с.
Shafirkin A.V., Grigoriev Yu.G. Interplanetary and orbital flights. Radiation risk for cosmonauts (Radiobiological justification. Moscow: Economica, 2009, 639 p.
18. Григорьев Ю.Г., Ушаков И.Б., Красавин Е.А., и др. Космическая радиобиология за 55 лет (к 50-летию ГНЦ РФ-ИМБП РАН. М.: Экономика, 2013.
Grigoriev Yu.G., Ushakov I.B., Krasavin E.A., et al. Space radiobiology for 55 years (to the 50th anniversary of the State Scientific Center of the Russian Federation-IMBP RAS) М.: Economics, 2013.
19. Бобков В.Г., Демин В.П., Кеирим-Маркус И.Б., Ковалев Е.Е., Ларичев А.В., Сакович В.А., Смиранный Л.Н., Сычков М.А. Радиационная безопасность при космических полетах. М.: Атомиздат, 1964.
Bobkov V.G., Demin V.P., Keirim-Markus I.B., Kovalev E.E., Larichev A.V., Sakovich V.A., Smirenny L.N., Sychkov M.A. Radiation safety during space flights. Moscow: Atomizdat, 1964.
20. Ковалев Е.Е. Радиационный риск на земле и в космосе. - М.: Атомиздат, 1976.
Kovalev E.E. Radiation risk on earth and in space. - М.: Atomizdat, 1976.
21. Frank G.M., Saksonov P.P., Antipov V.V., Dobrov N.N. Radiobiological problems of space flights // Basic environmental problems of Man in space: Proc. 1th Int. Symposium. Paris, 1962 / H. Bjurstedt, ed. Wien; New York, 1965. P. 254-266.
22. Parin V.V., Antipov V.V., Davydov B.I. Panchenkova E.F., Saksonov P.P. et al. Investigation of biological effectivity of ionizing radiation and other factors of space flight // XVth Int. Astronautical Congress (Warsaw, Sept. 7-12, 1964). Life Spacecraft, Oxford. 1965. V. 4 (Bioastronautics). P. 131-145.
23. Григорьев Ю.Г., Раевская С.А., Аврунина Г.А., Некоторые подходы к обоснованию величин допустимых доз для космонавтов при длительных космических полетах // Радиобиология, 1970, № 2, С 294-299.
Grigoriev Yu.G., Raevskaya S.A., Avrunina G.A., Some approaches to substantiating the values of permissible doses for astronauts during long-term space flights // Radiobiology, 1970, No. 2, pp. 294-299.

24. ГОСТ 25645. 201-83. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Термины и определения. М.: Госстандарт СССР, 198
- GOST 25645.201-83. Radiation Safety of Spacecraft Crew in Space Flight . Terms and Definitions. Moscow: USSR State Standard, 1984.
25. Руководящий документ РД 50-25645.206-84. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Методика расчета ионизационных потерь и пробегов тяжелых заряженных частиц. М. Госстандарт СССР. 1985.
- Guidance document RD 50-25645.206-84. Radiation safety of spacecraft crews during space flight. Methodology for calculating ionization losses and ranges of heavy charged particles. Moscow, USSR State Standard. 1985.
26. Методические указания МУ 2.6.1.44-03-2004. Ограничение облучения космонавтов при околоземных космических полетах. М. 2004.
- Methodological guidelines MU 2.6.1.44-03-2004. Limiting cosmonaut irradiation during near-Earth space flights. Moscow, 2004.
27. Григорьев Ю.Г., Ушаков И.Б., Шафиркин А.В. Согласованные подходы и сохраняющиеся различия в вопросах радиационного нормирования в СССР (Россия) и США применительно к длительным пилотируемым космическим полетам. // Гигиена и санитария, 2017, Т. 96, № 9, С. 861-867.
- Grigoriev Yu.G., Ushakov I.B., Shafirkin A.V. Coordinated approaches and persistent differences in radiation regulation issues in the USSR (Russia) and the USA with regard to long-term manned space flights. // Hygiene and Sanitation, 2017, Vol. 96, No. 9, pp. 861-867.
28. Методические рекомендации МР ФМБА 17.01-2021 Ограничение облучения космонавтов при околоземных космических полетах (ООКОКП – 2021). М. 2021.
- Methodological recommendations of the Federal Medical and Biological Agency 17.01-2021 "Limiting cosmonaut radiation exposure during near-Earth space flights". Moscow, 2021.
29. ГОСТ 25645.203-83. Модель тела человека для расчета тканевой дозы. Госстандарт, Москва, 1984.
- GOST 25645.203-83. Human body model for tissue dose calculation. Gosstandart, Moscow, 1984.
30. Шафиркин А.В., Федоренко Б.С. Обоснование зависимости коэффициентов качества излучений от ЛПЭ применительно к оценке ближайших радиобиологических эффектов. // Авиакосмическая и экологическая медицина, 1998, Т. 32, N 2, с. 4-9.
- Shafirkin A.V., Fedorenko B.S. Justification of the dependence of radiation quality factors on LET in relation to the assessment of immediate radiobiological effects. // Aerospace and Environmental Medicine, 1998, Vol. 32, No. 2, pp. 4-9.
31. Рекомендации Международной комиссии по радиологической защите 1990 года. Пределы годового поступления радионуклидов в организм работающих, основанные на рекомендациях 1990 года. Публикации N 60 и 61 - М.: Энергоатомиздат 1994, 189 с.
- Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Limits for annual intake of radionuclides by workers, based on the 1990 recommendations. Publications No. 60 and 61 - M.: Energoatomizdat 1994, 189 p.
32. ГОСТ 25645.218-90. Зависимость коэффициента качества космических излучений от линейной энергии. - М.: Госстандарт СССР, 1991.
- GOST 25645.218-90. Dependence of the Quality Factor of Cosmic Radiation on Linear Energy. Moscow: USSR Gosstandart, 1991.
33. ГОСТ 25645.219-90. Модель учета влияния пространственной неравномерности радиационного воздействия на обобщенный радиобиологический эффект. М.: Госстандарт СССР, 1991.
- GOST 25645.219-90 Model for Accounting for the Influence of Spatial Non-uniformity of Radiation Exposure on the Generalized Radiobiological Effect. Moscow: USSR Gosstandart, 1991.
34. Григорьев Ю.Г. Космическая радиобиология, М. Энергоатомиздат, 1982.
- Grigoriev Yu.G. Space Radiobiology, M. Energoatomizdat, 1982.
35. Антипов В.В., Давыдов Б.И., Вериге В.В., Свиричев Ю.М. О комбинированном действии различных факторов полета. В кн.: Основы космической биологии и медицины. М.: Наука. - 1975. - Т. 2, кн. 2, с.243-267.
- Antipov, V.V., Davydov B.I., Verigo V.V., Svirezhev Yu.M. On the Combined Effects of Various Flight Factors, in: Fundamentals of Space Biology and Medicine, Moscow: Nauka, 1975, Vol. 2, Book 2, pp. 243-267.
36. Проблемы радиационной безопасности космических полетов. Физические и биологические

- ческие исследования с протонами больших энергий. Под ред. Ю.Г. Неведова М.:Атомиздат, 1964.
- Problems of Radiation Safety in Space Flights. Physical and Biological Research with High-Energy Protons. Edited by Yu. G. Nefedov. Moscow: Atomizdat, 1964.
37. Биологическое действие протонов высоких энергий (к оценке радиационной опасности космических полетов). Под ред. Ю.Г. Григорьева. Атомиздат. М.: 1967.
Biological Effects of High-Energy Protons (Towards Assessing the Radiation Hazard of Space Flight). Ed. Yu. G. Grigoriev. Atomizdat. Moscow: 1967.
 38. Федоренко Б.С. Радиобиологические эффекты корпускулярных излучений. Радиационная безопасность космических полетов. М. Наука, 2006.
Fedorenko, B.S. "Radiobiological Effects of Corpuscular Radiation. Radiation Safety of Space Flights. Moscow: Nauka, 2006.
 39. Ульянова В.А., Шафиркин А.В., Фарбер Ю.В., Маркелов Б.А. Некоторые закономерности формирования радиационного поражения и развития восстановительных процессов в кроветворной ткани мышей после повторных воздействий быстрых нейтронов и гамма-излучения. // Радиобиология, 1987, Т. 27, в 4, с. 510-515.
Ulyanova V.A., Shafirkin A.V., Farber Yu.V., Markelov B.A. Some patterns of formation of radiation damage and development of recovery processes in hematopoietic tissue of mice after repeated exposure to fast neutrons and gamma radiation. // Radiobiology, 1987, Vol. 27, N 4, pp. 510-515.
 40. Шафиркин А., Митрикас В.Г., Бондаренко В.А. Расчеты эффективных остаточных среднетканевых доз от СКЛ у космонавтов при длительных полетах на станции «Мир» и МКС с учетом восстановительных процессов // Авиакосмическая и экологическая медицина 2025 Т. 59. № 4 С. 35-46
Shafirkin A., Mitrikas V.G., Bondarenko V.A. Calculations of Effective Residual Average Tissue Doses from SCR in Cosmonauts on Long-Term Flights on the Mir Station and the ISS, Taking into Account Recovery Processes // Aerospace and Environmental Medicine 2025 Vol. 59, No. 4, pp. 35-46.
 41. ГОСТ 25645.215-85. Нормы безопасности при продолжительности полетов до трех лет. М.: Госстандарт СССР, 1986.
GOST 25645.215-85. Safety Standards for Flights of Up to Three Years. Moscow: USSR State Standard, 1986.
 42. Баевский Р.М., Берсенева А.П. Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний. М.: Медицина, 1997, 236 с.
Baevsky R.M., Berseneva A.P. Assessment of the adaptive capabilities of the organism and the risk of disease development. Moscow: Medicine, 1997, 236 p.
 43. Ушаков И.Б., Петров В.М., Шафиркин А.В. Специфика применения радиационного риска при оценке опасности воздействия космической радиации в полете. Труды международной конференции "Влияние космической погоды на человека в космосе и на Земле" 4-8 июня 2012 г. Т. 1. М. ИКИ РАН, 2013, С. 200-222.
Ushakov I.B., Petrov V.M., Shafirkin A.V. "Specifics of Applying Radiation Risk in Assessing the Hazard of In-Flight Cosmic Radiation Exposure. Proceedings of the International Conference "The Impact of Space Weather on Humans in Space and on Earth", June 4-8, 2012. Vol. 1. Moscow: IKI RAS, 2013, pp. 200-222.
 44. Шафиркин А.В., Штемберг А.С., И.Э.Есауленко, В.И. Попов Экология, социальный стресс, здоровье населения и демографические проблемы России. - Воронеж: Научная книга, 2009. - 435 с.
Shafirkin A.V., Shtemberg A.S., I.E. Esaulenko, V.I. Popov Ecology, social stress, public health and demographic problems of Russia. - Voronezh: Nauchnaya kniga, 2009. - 435 p.
 45. Geard C.R., Jenkins-Baker G., Grabham P. et al. Human endothelial cells in 2 D and 3-D system. Noncancer effects and space-related radiations. 4-th International Workshop on Space Radiation Research and 17-th Annual NASA Space Radiation Health. Investigators Workshop, Dubna, 2006, pp. 34-35.
 46. Ivanov VK, Maksyutov MA, Chekin S.Yu. Radiation-Epidemiological Analysis of the Non-cancer Morbidity of Chernobyl liquidators Catastrophe. // Radiation and Risk, 2001, No. 12, p. 82-98.
 47. Little M.P., Azizova T.V., Bazika D., Bouffler S.D., Cardis E. et.al. Systematic Review and Meta-analysis of Circulatory Disease from Exposure to Low-Level Ionizing Radiation and Estimates of Potential Population Mortality Risks. // Environmental Health Perspectives, 2012, V. 120, N 11, pp. 1503-1511.

48. Шафиркин А.В., Григорьев Ю.Г., Ушаков И.Б., Шуршаков В.А. Биологическая эффективность быстрых нейтронов и ускоренных многозарядных ионов для построения новой зависимости коэффициентов качества космических излучений от линейной передачи энергии. // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2021, Т. 55, № 3, С. 5-15.
Shafirkin A.V., Grigoriev Yu.G., Ushakov I.B., Shurshakov V.A. Biological efficiency of fast neutrons and accelerated multiply charged ions for constructing a new dependence of the quality factors of cosmic radiation on linear energy transfer. // *Aerospace and Environmental Medicine*. 2021, Vol. 55, No. 3, pp. 5-15.
49. Шафиркин А.В., Васин А.Л., Татаркин С.В. К обоснованию коэффициентов модификации КМБ и КМО радиационного ответа организма в ближайшем и отдаленном периодах за счет комплексного действия стрессовых факторов при длительных орбитальных и межпланетных полетах. // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2022, Т. 56, № 4, С. 5-20.
Shafirkin A.V., Vasin A.L., Tatarkin S.V. "Toward substantiating the modification coefficients of the KMB and KMO of the body's radiation response in the near and late periods due to the complex action of stress factors during long-term orbital and interplanetary flights. // *Aerospace and Environmental Medicine*. 2022, Vol. 56, No. 4, pp. 5-20.
50. Шафиркин А.В., Бенгин В.В., Шуршаков В.А. Локальные тканевые дозы при полете вне магнитосферы Земли за различной защитой космического корабля с учетом снижения эффективности действия протонов и ионов гелия. // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2025, Т. 59, № 1, С. 44-54.
Shafirkin A.V., Bengin V.V., Shurshakov V.A. Local tissue doses during a flight outside the Earth's magnetosphere behind various spacecraft shielding, taking into account the reduced efficiency of protons and helium ions. // *Aerospace and Environmental Medicine*. 2025, Vol. 59, No. 1, P. 44-54.
51. Шафиркин А.В. Продолжительность жизни космонавтов СССР (России) и астронавтов США и риски для здоровья при действии различных стрессорных факторов на Земле и в космосе. // *Авиакосмическая и экологическая медицина*, 2019, Т. 53, № 7, С. 5-18.
Shafirkin A.V. Life Expectancy of USSR (Russian) Cosmonauts and US Astronauts and Health Risks from Various Stressors on Earth and in Space. // *Aerospace and Environmental Medicine*, 2019, Vol. 53, No. 7, pp. 5-18.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований РАН № FMFR-2024-0036.

Поступила: 21.02.2026. Принята к публикации: 17.06.2026.

Conflict of interest. The author declare no conflict of interest.

Financing. The work was carried out within the framework of the Fundamental Scientific Research Program of the Russian Academy of Sciences No. FMFR-2024-0036.

Article received: 21.02.2026. Accepted for publication: 17.06.2026.