

# МАТЕРИАЛЫ К КАРДИНАЛЬНОМУ ПЕРЕСМОТРУ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ВЕДУЩЕЙ ОПАСНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ПРЕДСТОЯЩИХ ОРБИТАЛЬНЫХ И МЕЖПЛАНЕТНЫХ ПОЛЕТОВ

Действующие на начальной фазе освоения космоса нормативные документы регламентировали допустимые дозы для кратковременных орбитальных полетов и для полетов по трассе Земля – Луна – Земля с общей продолжительностью до 30 сут. Они были основаны на анализе большого объема радиобиологических данных по протяженному и острому облучению мелких лабораторных животных и крупных млекопитающих в различных дозах, а также данных по аварийному облучению людей. При их разработке был обобщен большой клинический материал, касающийся осложнений при лучевой терапии. При нормировании радиационного воздействия применительно к кратковременным полетам основная задача сводилась к ограничению уровня облучения от протонов солнечных космических лучей (СКЛ) с целью недопущения сколько-нибудь значимого снижения работоспособности космонавтов, возможности развития у них первичной лучевой реакции (ПЛР) средней степени тяжести (близкой по характеру к болезни движения космонавтов в начальном периоде полета) и выраженного снижения концентрации клеток костного мозга и периферической крови в процессе полета.

Обсуждение допустимых пределов доз для космонавтов (астронавтов) применительно к кратковременным орбитальным полетам и для полетов к Луне проводилось на нескольких международных биоастронавтических конгрессах и конгрессах по радиационным исследованиям, в которых принимали участие радиобиологи, физиологи, клиницисты и фармакологи 3 институтов СССР (ГНИИИ авиационной и космической медицины МО СССР, Института биофизики и Института медико-биологических проблем Минздрава СССР) и их коллеги из США. Были установлены близкие регламенты доз в первых нормативах СССР и в США. Данные регламенты предполагали, что максимальную преобладающую опасность для космонавтов представляют стохастически распределенные во времени особенно мощные солнечные протонные события (СПС): жесткие по спектру и с большим потоком протонов. Нормативы допускали пределы доз, обуславливающие лишь слабовыраженные проявления ПЛР, такие, как небольшая слабость, головная боль, снижение аппетита, легкое головокружение. Глубина временного снижения концентрации клеток периферической крови не должна была превышать 25 %. В более поздних публикациях и трансформациях нормативных документов в СССР (России) и США по радиационной безопасности космических полетов вплоть до 2010 г при оценках радиационного риска, как – правило, сохранялось данное представление о ведущей опасности СКЛ.

В 2023 г. будет отмечаться 60 лет исследованиям в ГНЦ РФ – ИМБП РАН по обеспечению безопасности уже длительных пилотируемых орбитальных полетов, в том числе 65-летний юбилей исследованиям по космической радиобиологии. Значительное количество комплексных радиобиологических исследований за этот период было проведено сотрудниками различных институтов страны на базе Объединенного института ядерных исследований в г. Дубне на ускорителях протонов и ускоренных многозарядных ионов. Выпущено значительное число монографий и защищено большое количество диссертаций, в которых показано, что коэффициент относительной биологической эффективности (ОБЭ) протонов с энергией 50- 720 МэВ по отношению к облучению на гамма-установках с источниками  $^{60}\text{Co}$  и  $^{137}\text{Cs}$  равен 1,0 и можно использовать накопленные закономерности по формированию эффективной остаточной дозы, учитывающей быстрые восстановительные процессы в радиочувствительных тканях на клеточном уровне. Это приводит к снижению эффективности поражения организма и повышению его жизнеспособности. Эти эффекты начинают проявляться в условиях протяженных гамма-облучений длительностью более часа.

В докладе подробно будут рассмотрены материалы о дополнительном снижении эффективности биологического действия протонов для наиболее мощных СПС 19-24 солнечных циклов, которое обусловлено очень быстрыми восстановительными процессами в радиочувствительных тканях организма на клеточном уровне. Ранее в большом числе публикаций снижение эффективности воздействия протонов на отдельные органы и ткани связывали лишь с защитными конструктивными характеристиками космических аппаратов (КА) и станций, а также учитывали самоэкранировку отдельных органов другими тканями. Реальное поражение организма фактически было обусловлено величиной среднетканевой

дозы. Действительно за малой толщиной защиты КА в пределах 1 г/см<sup>2</sup> алюминия для СПС августа 1972 г. или серии событий октября 1989 г уровни среднетканевых эквивалентных доз могут составить 4,6 и 2,2 Зв и соответствуют высокому смертельному риску или развитию тяжелых форм лучевой болезни. Однако при реальной защите 20 г/см<sup>2</sup> алюминия среднетканевые дозы снижаются в 40 и в 20 раз соответственно и эти дозы не превысят 15 сЗв - допустимый уровень в самых первых нормативах, при котором с малым риском могут наблюдаться лишь слабые проявления ПЛР.

Кроме того в литературе показано, что за период времени развития СПС 36-48 часов уже успевают проявиться быстрые восстановительные процессы на клеточном уровне во всех радиочувствительных тканях при малых значениях мощностей доз  $\gamma$ . Фактически мощности дозы за защитой космических аппаратов (КА) и станций являются на несколько порядков меньшими граничного значения  $\gamma\Gamma = 40$  Гр/сут. Снижение эффективности для кроветворной системы определяется на основе уравнения  $KB = (\gamma/\gamma\Gamma)^{0,18}$ . С существенно большей скоростью протекают восстановительные процессы для клеток кишечного эпителия и кожи  $KB = (\gamma/\gamma\Gamma)^{0,36}$ . Реальные эффективные дозы за счет этих эффектов дополнительно будут снижены в 3-5 раз.

В последнее время исследователи в большей степени обращают свое внимание на опасность воздействия не СКЛ, а высокоэнергетичных галактических космических лучей (ГКЛ) на работоспособность космонавтов в процессе полета и на возможный, более высокий риск отдаленных неблагоприятных последствий. Тем более что обеспечить защиту КА от ГКЛ значительно труднее из-за дополнительного вклада в суммарную дозу вторичных излучений: нейтронов и широкого спектра ионов высоких энергий с большими значениями ЛПЭ и коэффициентами качества этих излучений.

В большом числе исследований за последние 30 лет показано, что по таким отдаленным последствиям, как цитогенетические нарушения в лимфоцитах крови и эпителии хрусталика, трансформации клеток и развитии опухолей разных тканей, по сокращению продолжительности жизни, по нарушению нейронов в ЦНС и риску образования помутнений и развитию катаракт, максимальные оценки коэффициентов ОБЭМ быстрых нейтронов и ускоренных многозарядных ионов (УМИ), особенно в малых дозах, существенно превышают значения в существующих в настоящее время нормативных зависимостях коэффициента качества (КК) излучения от ЛПЭ. Это приведет при утверждении новых нормативов к значительному в 2,0-2,5 раза увеличению оцениваемых значений обобщенных эквивалентных доз для ГКЛ и величин суммарного радиационного риска. Поэтому в настоящее время для снижения опасности воздействия ГКЛ при осуществлении длительных космических полетов, особенно при предстоящих межпланетных полетах к Луне и Марсу многие исследователи большее внимание уделяют вопросам оптимизации физической защиты КА.

## Секция

Медико-биологические проблемы космических полетов

**Primary author:** ШАФИРКИН, Александр (ГНЦ РФ – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия )

**Presenter:** ШАФИРКИН, Александр (ГНЦ РФ – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия )