

УДК 537.591:612.014.482.5:577.462

Х. К. Мурадян

Інститут геронтології Академії медичинських наук України, Київ

Космическая ионизирующая радиация: природа, биологические эффекты и защита

Надійшла до редакції 26.07.01

Робиться огляд публікацій останніх років, присвячених медико-біологічним ефектам космічного іонізуючого випромінювання (КИР). Наголошується, що реалізація штучного тяжіння на КА в основному зніме проблему невагомості як основного негативного фактора космічних польотів. При цьому найгострішою нерозв'язаною проблемою космічної біології та медицини залишиться КИР, яке лімітуватиме термін перебування людини в космосі та дальність космічних експедицій. Протони, електрони та іони металів високих енергій характеризуються високою щільністю іонізації та руйнівним ефектом, які суттєво переважають аналогічні показники для рентгенівських або γ -променів. Критичною мішенню дії КИР, очевидно, є геном і мембрани клітин в органах, розміщених ближче до поверхні тіла. Коротко обговорено останні публікації з панспермії, згідно з якою КИР та інші надзвичайно жорсткі умови відкритого космосу не виключають можливості існування своєрідного пулу живих систем у Всесвіті та їхнє природне перенесення з планети на планету.

ВВЕДЕНИЕ

Космическое ионизирующее излучение (КИР) еще до начала освоения космоса считалось фактором, способным существенно осложнить пребывание человека вне пределов земной атмосферы. После десятилетий исследований на орбите и Земле опасения только возросли. Стало очевидным, что КИР может иметь серьезные последствия для здоровья человека как при полете, так и во время восстановительного периода после возвращения на Землю [3, 27—29].

Невесомость и КИР всегда считались самыми опасными факторами при длительном пребывании человека в космосе. Причем борьба с невесомостью представлялась более трудной задачей, так как полагали, что от КИР можно защититься с помощью экранов, в то время как гравитация не поддается экранировке. Однако в действительности все оказалось не так. Экранировка с помощью традиционных материалов (алюминий, свинец и др.) осложнена из-за легкости возбуждения вторичной радиации. Вместе с тем ожидаемая в скором будущем реализация идеи искусственной гравитации путем создания космических аппаратов большого диаметра, медленно вращающихся вокруг соб-

ственной оси, может разрешить или значительно снизить остроту проблемы невесомости [22, 39]. Более того, согласно нашей концепции об оптимальной гипогравитации искусственная гравитация может не только устранить экстремальные последствия невесомости, но в определенном диапазоне (0.2—0.5 g) ожидаются положительные эффекты, обусловленные, например, снижением «антигравитационных» затрат организма [34].

И хотя на этом пути предстоит преодолеть немало технических и прикладных проблем, тем не менее с научной точки зрения проблему невесомости, вероятно, можно считать решенной. Очевидно, в скором будущем КИР станут наиболее острой проблемой космической биологии, существенно ограничивающей продолжительность и дальность полетов человека в космосе.

ПРИРОДА КОСМИЧЕСКОЙ ИОНИЗИРУЮЩЕЙ РАДИАЦИИ

Считается, что КИР состоит из различных видов излучений, включая фоновые галактические космические лучи и излучения, испускаемые в ходе солнечных вспышек. Немаловажное значение мо-

жет иметь также радиоактивность, обусловленная атомными движителями или другими бортовыми приспособлениями. Угроза от столь разнообразных по происхождению и проникающему эффекту лучей, естественно, требует адекватных контрмер, включая постоянный телеметрический мониторинг за радиационной обстановкой и состоянием экипажа [25].

Радиация нашей Солнечной системы определяется потоком частиц галактического и солнечного происхождения. Галактическая радиация, входящая в Солнечную систему, состоит в основном из протонов (85 %), электронов (14 %) и около 1 % легких (H, He) или тяжелых (Fe, C, Si) ионов. Другая часть ионизирующих частиц, состоящая на 90—95 % из протонов и 5—10 % α -частиц, имеет солнечное происхождение. Эти частицы в основном испускаются при солнечных вспышках и разносятся солнечным «ветром». Энергия космических электронов обычно составляет тысячи — миллионы электрон-вольт; энергия протонов находится в диапазоне сотен МэВ, а энергия космических ионов обычно измеряется в единицах ГэВ. Даже в пределах низких земных орбит (до 500 км) есть немало зон с высоким уровнем КИР, в частности пояса Ван Аллена, Северный и Южный полюса, Южно-атлантический район аномалий и др. В результате получаемая экипажем доза находится в широком диапазоне в зависимости от параметров орбиты, солнечного цикла, длительности пребывания на орбите, конфигурации защитной экранировки и др. [3, 24, 27, 33, 38].

Радиационная обстановка вне земной атмосферы может быть намного сложнее, чем на Земле, так как земная магнитосфера существенно экранирует КИР. Тем не менее, защитное действие атмосферы не может быть абсолютным, и некоторые эффекты КИР, как полагают, можно наблюдать и на Земле. Хотя подобные результаты нуждаются в дополнительной проверке, можно отметить данные о повышении смертности от сердечных заболеваний или самоубийств в периоды усиленного космического протонного потока [30]. Заслуживают также внимания данные о корреляции между уровнем общей смертности и изменениями различных геомагнитных параметров Земли. Например, анализ смертности в Москве за более чем столетний период (между 1867—1996 гг.) обнаружил увеличение смертности примерно на 30 % в период геомагнитных бурь. Для сравнения, влияние атмосферных осадков было несущественным; повышение температуры в зимне-летний период и ее понижение в осенний период сопровождалось пограничным для статистической достоверности 10 % увеличением смертности [2].

Примечательно, что КИР признана фактором риска не только для участников космического полета, но и для некоторых категорий служащих авиационных компаний. Например, годовая доза в регионах Земли с нормальным уровнем естественной радиации обычно составляет около 2.4 мЗв, из которых на долю КИР приходится 0.3 мЗв. Годовая же доза летчиков, например, Конкорда Британских Авиалиний в несколько раз выше (более 6 мЗв). В будущем, в связи с созданием гиперзвуковых самолетов с более высоким потолком полета доза радиации, получаемая экипажами и часто летающими пассажирами, может увеличиться, так как интенсивность КИР заметно увеличивается с высотой [4].

УРОВЕНЬ И ЭКРАНИРОВКА КОСМИЧЕСКОЙ ИОНИЗИРУЮЩЕЙ РАДИАЦИИ

Уровень радиации в космосе существенно превосходит аналогичные показатели на Земле, что, впрочем, может стать нарушением радиационных норм для наземного обслуживающего персонала, но не для участников космического полета. Допустимые дозы для последних значительно выше [1]. Например, комбинация термолюминесцентной дозиметрии с пластиковыми детекторами треков ядер показала, что при 10-сут полете по низкой орбите поглощенная доза в разных органах колеблется в пределах 1.7—2.7 мГр при средней эффективной дозе 4 мЗв [38]. Наибольшая поглощенная доза составляла 3.2 мЗв при полете на американском челноке STS-82, в то время как на станции «Мир» где продолжительность полетов обычно значительно дольше, максимальная доза доходила до 8.7 мЗв. Уровень радиации мог отличаться в несколько раз в разных отсеках одного и того же модуля и примерно в столько же раз при сравнении разных модулей [3].

Эффект КИР все же в большей степени определяется не параметрами орбиты, а конфигурацией защитной экранировки. При этом следует учесть, что радиация внутри корабля принципиально отличается от внешнего потока в силу того, что космические частицы имеют слишком высокую плотность ионизации, чтобы проникнуть сквозь материал сколько-нибудь существенной толщины. Однако поражающий их эффект остается достаточно высоким, так как их соударение с ядрами экранирующего материала приводит к возникновению вторичной радиации. Наиболее эффективный защитный материал, очевидно, должен содержать как можно больше атомов водорода, так как последние не

способны генерировать вторичное излучение [27].

Большая часть вторичной радиации является следствием попадания в обшивку космических протонов. Доля таких лучей особенно велика (до 80—90 %) при плотности обшивки более 1 г/см^2 , что эквивалентно слою алюминия толщиной примерно 4 мм. Защитная обшивка космических кораблей обычно имеет плотность выше 1 г/см^2 , тогда как костюмы для работы в открытом космосе отличаются меньшей плотностью. Например, плотность обшивки станции «Мир» составляла 8—15 г/см^2 , в то время как костюмы для работы в открытом космосе, предназначенные для лиц, обитающих в американском отсеке Международной космической станции, имеют плотность 0.2—0.9 г/см^2 [33].

Поглощенная доза КИР в значительной степени зависит от длительности экспозиции и степени защищенности экипажа. Например, среднесуточная доза составляла 0.3 мЗв для участников полета на борту станции «Мир», 1 мЗв — для американских челноков многократного использования и 5 мЗв при работе в открытом космосе. Для сравнения облучение человека на Земле в среднем составляет 2—3 мЗв в год, тогда как предельные профессиональные ограничения для астронавтов США составляют 250 мЗв за месяц, 500 мЗв за год и 1.5—4 Зв за всю карьеру. Нетрудно убедиться, что эти предельно допустимые величины могут быть превышены при частых выходах в открытый космос или, например, участием в шести экспедициях на борту Международной космической станции, каждая длительностью до шести месяцев. Примечательно, что Национальный совет по радиационной безопасности и Научный комитет по радиационным измерениям США рекомендуют предельные дозы радиации в зависимости от возраста. Такой лимит соответствует 5 % увеличению заболевания раком и составляет 1.5, 2.5, 3.25 и 4 Зв для мужчин и 1, 1.75, 2.5 и 3 Зв для женщин возраста 25, 35, 45 и 55 лет [33]. Это, очевидно, может быть определенной профессиональной «компенсацией» для лиц с поздним началом карьеры астронавта. В самом деле, следуя этой рекомендации, участниками будущих космических экспедиций должны быть люди преимущественно «геронтологического» возраста, так как практически все сколько-нибудь длительные полеты будут связаны с риском получения достаточно больших доз, допустимых только для участников полета старших возрастов. Впрочем, в настоящее время эти дозы пересматриваются из-за тенденции снижения допустимых доз практически на всех наземных и орбитальных службах НАСА [29].

Хотя за основу многих ограничений принято возможное влияние КИР на развитие рака, анализ

существующего материала не дает оснований полагать, что астронавты находятся под более высоким риском развития этого заболевания. Оказалось, что астронавты и космонавты отличаются высоким уровнем смертности, обусловленной профессиональными травмами и катастрофами, но не развитием рака. Оценки показали, что уровень смертности из-за рака у астронавтов несколько ниже, чем у остального населения США [5, 14]. Впрочем, сравнение элитарной во многих отношениях и немногочисленной группы астронавтов с общим населением не совсем корректно и нуждается в большей осторожности при подборе контрольной группы. Действительно, результаты последних лонгитудинальных исследований НАСА показали, что смертность астронавтов выше среднестатистического уровня только для профессиональных травм и катастроф ($P < 0.0001$), но не для рака ($P > 0.2$), сердечно-сосудистых заболеваний ($P > 0.8$) или иных причин ($P > 0.5$) при сравнении с более адекватной контрольной группой, которая состояла из наземных служащих Космического центра имени Джонсона [15].

Космонавты и астронавты имеют статус лиц, работающих в условиях повышенной радиации, поэтому их постоянная дозиметрия, особенно во время полетов, обязательна. Тем не менее различия уровня радиации и особенно биологической эффективности поглощенной дозы и другие малоизученные пока факторы вносят недопустимо высокую неопределенность в проблему. Для того чтобы устранить хотя бы часть таких помех, было предложено использовать периферические лимфоциты и другие клетки крови в качестве биологического дозиметра, который нельзя потерять и который всегда вместе с испытуемым. Выяснилось, что подсчет хромосомных aberrаций может быть достаточно чувствительным и точным способом оценки влияния КИР на организм человека. Этот способ имеет порог чувствительности около 0.1 Гр, выше которого точность определений существенно увеличивается. Сравнение пре- и постполетных образцов крови позволило заключить, что поглощенная доза, например, при 115-суточной миссии на борту «Мир-18» составляла 14.8 сЗв, тогда как физическая дозиметрия указывала только на 5.2 сЗв, т. е. согласно этому методу относительная биологическая эффективность КИР была близка к 2.8 [12, 37].

В любом случае следует иметь в виду, что радиация проникает в каждый отсек космического корабля, и при продолжительных полетах КИР может стать угрозой номер один для работоспособности и здоровья членов экипажа. Более того, не

исключено, что повреждения, индуцированные КИР, окажутся устойчивыми во времени и способными вызвать ускоренное старение по мере их суммирования с возрастными нарушениями. Все эти соображения об отдаленных последствиях КИР, безусловно, должны быть заблаговременно учтены.

В определенной степени влияние КИР как лимитирующего космического фактора просматривается уже в наши дни. Согласно Медицинским стандартам НАСА любая беременная участница отстраняется от полетов, несмотря на понимание необходимости изучения репродукции человека за пределами Земли. Хотя при разработке такого запрета стрессовые влияния гипер- и микрогравитации или искусственной атмосферы летательного аппарата не должны быть недооценены, все же основной причиной запрета были опасения влияния КИР на развитие плода [31].

МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ КОСМИЧЕСКОЙ ИОНИЗИРУЮЩЕЙ РАДИАЦИИ

Подобные опасения влияния КИР отнюдь не бесосновательны, особенно если учесть, что биологическая эффективность КИР, отличающейся высокой степенью плотности ионизации, заметно выше, чем у обычных рентгеновских или γ -лучей. Как выяснилось, тяжелые ионы с высокой энергией более эффективны при индукции разрывов, делеций и транслокаций хромосом или при образовании дигетерозигот и других аберрантных генетических структур [9, 36]. Сравнение показало, что частота хромосомных аберраций, индуцированных γ -лучами или ядрами Fe энергией 1 ГэВ в костном мозге, фибробластах и эпителиальных клетках легких, была примерно втрое выше в опытах с облучением ионами железа. С помощью микродозиметрии было показано, что на каждую клетку, пораженную ионами железа, приходилось примерно 30 клеток, пораженных вторичной радиацией [6].

По оценке количества фрагментированных ядер культуры клеток китайского хомячка, митотическая катастрофа, индуцированная протонными пучками (1, 3 и 5 МэВ), также была выше у протонов, чем у γ -лучей [13]. Облучение фибробластов человека ядрами, обладающими высокой плотностью ионизации, а именно ядрами углерода (13 и 80 КэВ/мкм), кремния (55 КэВ/мкм) и железа (140, 185 и 440 КэВ/мкм), обнаружило, что тяжелые ионы имеют большую эффективность в образовании изохроматидных разрывов [21]. Облучение крови человека частицами железа (1 ГэВ), неона (400 МэВ) или γ -лучами вызывало сложные

хромосомные повреждения, также более выраженные при работе с частицами с высокой плотностью ионизации [13].

Трансгенные животные с интегрированными мишеневыми генами представляют уникальные возможности для изучения интенсивности и распределения мутаций под влиянием неблагоприятных воздействий. В последние годы особое внимание привлекли исследования, в которых анализировалась роль гена супрессора опухолей p53, который принимает активное участие в регуляции клеточного цикла, пролиферации, дифференцировке, старении и апоптозе клетки. Облучение ядрами железа (1 ГэВ в дозе 1 Гр) показало, что по сравнению со спонтанным уровнем в мозге мышей с диким типом гена p53 (p53 +/+) частота мутаций увеличивалась в 1.7 раз через 8 недель после облучения. У животных, в геноме которых не было генов p53 (p53 -/-), частота мутаций увеличивалась в 2.2 раза уже через неделю. В клетках селезенки облученные ядрами железа привело к увеличению частоты мутаций в 2.6 раза [7].

Обобщая результаты представленных работ, можно заключить, что КИР обладает широким диапазоном мишеней и значительно большей эффективностью поражения генома и клетки в целом, чем рентгеновские или γ -лучи. Более того, влияние КИР может быть значительно усилено из-за взаимодействия с другими негативными факторами полета, например микрогравитацией [16, 26, 32, 35]. Показательной является оценка, согласно которой при средних характеристиках длительности космического полета и защиты от КИР (три года за алюминиевой обшивкой 4 г/см²) ядро клетки должно быть пробивают 400 протонов, 0.6 космических частиц углерода и 0.03 — железа. Для клетки эти оценки должны быть в сотни раз выше [27].

Для КИР должны быть характерными стимуляция образования свободных радикалов, развитие окислительного стресса и усиление перекисного окисления липидов (ПОЛ). Сравнение крыс, находившихся в течение 8 сут на борту космического челнока «Shuttle STS-63», с наземной контрольной группой, находящейся в аналогичных с полетными условиях вибрации и температуры, или с полностью интактными наземными животными показало, что антиоксидантная система претерпевает изменения, которые свидетельствуют о существенном снижении защитного потенциала при полете. В печени крыс, находившихся на орбите, происходило снижение активностей каталазы, глутатион-редуктазы и глутатион-S-трансферазы; наблюдалось существенное снижение синтеза мРНК каталазы и супероксиддисмутазы, хотя активность и содержание

белка для последнего фермента существенно не изменялись. Нахождение в космосе вызвало резкое снижение содержания восстановленного и окисленного форм глутатиона и γ -глутамил транспептидазы. Снижение антиоксидантного потенциала сопровождалось усилением свободно-радикальных повреждений и ПОЛ, которые, судя по содержанию малонового диальдегида, увеличивались на 47 %. Все эти сдвиги свидетельствуют о том, что на орбите индуцированное КИР образование радикалов может иметь гораздо более тяжкие последствия. Впрочем, влияние снижения антиоксидантной защиты удавалось частично ослабить введением экзогенных антиоксидантов, например цистамина или пробуккола [11, 17].

КИР и другие факторы космического полета могут вызывать снижение функциональных возможностей и других метаболических и защитных систем, включая иммуносупрессию. На фоне повышенной аутоиммунитетности продолжительное пребывание в космосе грозит высоким риском развития вирусных, бактериальных и грибковых заболеваний [23]. Положение может быть усложнено из-за микрогравитации или проникновения в кабину вредных химических продуктов сгорания ракетного топлива, которые, как известно, отличаются высокой канцерогенностью. Анализ образцов вдыхаемой смеси газов, взятых из кабин летательных аппаратов, указывает на наличие в них опасных соединений в количествах, которые можно обнаружить обычными методами химического анализа, в частности таких канцерогенов, как дихлорметан, формальдегид, ацетальдегид, изопрен, бензен, фуран и др. [20].

Тренировки и другие меры предупреждения стресса могут несколько замедлить развитие общего снижения физического и психологических тонуса организма. Все же основной защитой от нежелательного развития событий в космосе, как и на Земле, остаются традиционные фармакологические средства, несмотря на их нарушенные фармакокинетику и фармакодинамику [23]. В свете сказанного поиск эффективных радиопротекторов приобретает дополнительную приоритетность. Несмотря на большой спрос в различных отраслях медицины и военной или космической науки и практики, современные радиопротекторы остаются малоэффективными или эффективными только в определенных условиях, например, при однократном облучении или при токсических концентрациях. Между тем актуальность этой проблемы настолько велика, что невзирая на многочисленные неудачи, поиск радиопротекторов продолжается во многих исследовательских коллективах мира, в том числе в нашей лаборатории.

Влияние КИР и других отрицательных факторов открытого космоса, включая почти нулевую абсолютную температуру и вакуум, тем не менее могут не являться непреодолимой преградой для живых систем, в частности бактериальных спор. Такая возможность поддерживается сторонниками хорошо известной концепции панспермии, которая была впервые предложена Аррениусом еще в 1903 г. Согласно этой концепции способные к репродукции живые тела распространены по всей Вселенной, тем самым создавая своеобразный пул «спящих» живых систем, которые могут быть активированы и использованы для внедрения жизни на планетах с подходящим климатом и другими условиями для поддержания биологической жизни (цит. по [24]). Действительно, имеющиеся данные не исключают возможность выживания и переноса микроорганизмов и их спор в космосе. Расчеты показывают, что столкновение с крупными астероидами и кометами может привести к развитию ускорений сжатия и последующего разжатия, которые достаточны для выноса материальных частиц за пределы гравитационного поля планет. Достаточно убедительным доказательством таких расчетов является коллекция марсианских и лунных пород на Земле. Живые микроорганизмы и особенно их споры могут выжить в таких породах, и следовательно, могут быть перенесены с одной планеты на другую [10]. Было показано, что бактериальные споры могут выжить даже после прямого соударения с такими разрушительными радиоактивными космическими частицами, как ядра железа. Следует учесть, что такое столкновение тем не менее должно быть достаточно редким событием. Споры могут путешествовать во Вселенной в течение нескольких сотен тысячелетий, прежде чем произойдет их соударение с космическими частицами, в то время как для переноса пород по наиболее короткой траектории, например с Марса на Землю, достаточно нескольких месяцев [24]. Нельзя, однако, не прислушаться к мнению наиболее осторожных специалистов в этой области, которые полагают, что наличие марсианских и лунных пород на Земле не может быть бесспорным доказательством возможности выживания и естественного межпланетарного переноса микроорганизмов или их спор, поэтому идея панспермии нуждается в более убедительных доказательствах [8].

Обобщая представленный материал, очевидно, следует еще раз подчеркнуть, что КИР представляет серьезную опасность для будущих космических путешественников. Более того, при условии успешного внедрения искусственной гравитации КИР может стать основным медико-биологическим фак-

тором, лимитирующим продолжительность и дальность таких экспедиций. Космические частицы, обладающие высокой энергией и плотностью ионизации, являются более эффективными для индукции различного рода повреждений генома и клетки. Такое утверждение особенно справедливо для клеток кожи и других органов, расположенных ближе к поверхности тела, включая органы чувств и репродукции. Защита от КИР с помощью щитов из обычных материалов (алюминий, свинец и др.) осложняется из-за генерации вторичной радиации. Вдобавок ко всему, отрицательное влияние КИР может быть усилено из-за взаимодействия с другими факторами космического полета. В то же время, хотя это трудно представить, нельзя исключить, что живые существа смогли бы выдержать разрушительное влияние КИР, выжить в суровых условиях открытого космоса и переноситься с планеты на планету.

1. Бондаренко В. А., Митрикас В. Г., Цейтлин В. В. Радиационная обстановка на орбитальном комплексе «Мир» во время минимум 22 солнечных циклов (1994—1996) // *Авиокосмич. Экология и Мед.*—2000.—34.—С. 21—24.
2. Гуляева Т. Л. Зависимость летальных исходов от метеорологических и космических факторов // *Биофизика.*—1998.—43.—С. 833—839.
3. Badhwar G. D. Radiation measurements in low Earth orbit: U. S. and Russian results // *Health Phys.*—2000.—79.—P. 507—514.
4. Bagshaw M., Irvine D., Davies D. M. Exposure to cosmic radiation of British Airways flying crew on ultralong haulroutes // *Occup. Environ. Med.*—1996.—53.—P. 495—498.
5. Brackley M. E., Curry J., Glickman B. W. A note on the relevance of human population genetic variation and molecular epidemiology to assessing radiation health risk for space travellers // *Mutat. Res.*—1999.—430.—P. 293—298.
6. Brooks A., Bao S., Rithidech K., et al. Relative effectiveness of HZE iron-56 particles for the induction of cytogenetic damage in vivo // *Radiat. Res.*—2001.—155.—P. 353—359.
7. Chang P. Y., Kanazawa N., Lutze-Mann L., Winegar R. HZE particle radiation induces tissue-specific and p53-dependent mutagenesis in transgenic animals // *Phys. Medica.*—2000.—17, Suppl.—P. 1—3.
8. Clark B. C. Planetary interchange of bioactive material: probability factors and implications // *Orig. Life Evol. Biosph.*—2001.—31.—P. 185—197.
9. Cucinotta F. A., Wilson J. W. Initiation-promotion model of tumor prevalence in mice from space radiation exposures // *Radiat. and Environ. Biophys.*—1995.—34.—P. 145—149.
10. Davies P. C. The transfer of viable microorganisms between planets // *Ciba Found Symp.*—1996.—202.—P. 304—311.
11. Dousset N., Moatti J. P., Moatti N., et al. Influence of the environment in space on the biochemical characteristics of human low density lipoproteins // *Free Radic. Res.*—1996.—24.—P. 69—74.
12. Edwards A. A. The use of chromosomal aberrations in human lymphocytes for biological dosimetry // *Radiat. Res.*—1997.—48, 5 Suppl.—S. 39—44.
13. George K., Wu H., Willingham V., et al. High- and low-LET induced chromosome damage in human lymphocytes: a time-course of aberrations in metaphase and interphase // *Int. J. Radiat. Biol.*—2001.—77.—P. 175—183.
14. Hamm P. B., Billica R. D., Johnson G. S., et al. Risk of cancer mortality among the Longitudinal Study of Astronaut Health (LSAH) participants // *Aviat. Space Environ Med.*—1998.—69.—P. 142—144.
15. Hamm P. B., Nicogossian A. E., Pool S. L., et al. Design and current status of the longitudinal study of astronaut health // *Aviat. Space Environ. Med.*—2000.—71.—P. 564—70.
16. Hartman P. S., Hlavacek A., Wilde H., et al. A comparison of mutations induced by accelerated iron particles versus those induced by low earth orbit space radiation in the FEM-3 gene of *Caenorhabditis elegans* // *Mutat. Res.*—2001.—474.—P. 47—55.
17. Hollander J., Gore M., Fiebig R., et al. Spaceflight downregulates antioxidant defense system in rat liver // *Free Radic. Biol. Med.*—1998.—24.—P. 385—90.
18. Horneck G. Impact of microgravity on radiobiological processes and efficiency of DNA repair // *Mutat. Res.*—1999.—430.—P. 221—228.
19. Ianzini F., Cherubini R., Mackey M. A. Mitotic catastrophe induced by exposure of V79 Chinese hamster cells to low-energy protons // *Int. J. Radiat. Biol.*—1999.—75.—P. 717—723.
20. James J. T. Carcinogens in spacecraft air // *Radiat. Res.*—1997.—148, 5 Suppl.—S. 11—16.
21. Kawata T., Durante M., Furusawa Y., et al. Dose-response of initial G2-chromatid breaks induced in normal human fibroblasts by heavy ions // *Int. J. Radiat. Biol.*—2001.—77.—P. 165—174.
22. Lackner J. R., DiZio P. Artificial gravity as a countermeasure in long-duration space flight // *J. Neurosci. Res.*—2000.—62.—P. 169—176.
23. Levine D. D., Greenleaf J. E. Immunosuppression during spaceflight deconditioning // *Aviat. Space Environ. Med.*—1998.—69.—P. 172—177.
24. Nicholson W. L., Munakata N., Horneck G., et al. Resistance of *Bacillus* endospores to extreme terrestrial and extraterrestrial environment // *Microbiol. Mol. Biol. Reviews.*—2001.—64.—P. 548—572.
25. Nicogossian A. E., Pober D. F., Roy S. A. Evolution of telemedicine in the space program and earth applications // *Telemed. J. E. Health.*—2001.—7.—P. 1—15.
25. Pross H. D., Casares A., Kiefer J. Induction and repair of DNA double-strand breaks under irradiation and microgravity // *Radiat. Res.*—2000.—153.—P. 521—525.
27. Setlow R. B. The U. S. National Research Council's views of the radiation hazards in space // *Mutat. Res.*—1999.—430.—P. 169—175.
28. Simonsen L. C., Wilson J. W., Kim M. H., Cucinotta F. A. Radiation exposure for human Mars exploration // *Health. Phys.*—2000.—79.—P. 515—525.
29. Sinclair W. K. Dose limits for astronauts // *Health Phys.*—2000.—79.—P. 585—590.
30. Stoupe E., Israelevich P., Gabbay U., et al. Correlation of two levels of space proton flux with monthly distribution of deaths from cardiovascular disease and suicide // *J. Basic Clin. Physiol. Pharmacol.*—2000.—11.—P. 63—71.
31. Sullivan R. The hazards of reproduction in space // *Acta Obstet. Gynecol. Scand.*—1996.—75.—P. 372—377.
32. Takahashi A., Ohnishi K., Takahashi S., et al. The effects of microgravity on ligase activity in the repair of DNA double-strand breaks // *Int. J. Radiat. Biol.*—2000.—76.—P. 783—788.
33. Thomson I. EVA dosimetry in manned spacecraft // *Mutation Res.*—1999.—430.—P. 203—209.
34. Timchenko A. N., Muradian Kh. K. Optimal hypogravity: a panacea in manned space flights? // 17th Congress of the International Association of Gerontology. Vancouver, Canada.

- July 1—6, 2001. Abstracts. Gerontology, 47, Suppl. 1, P. 102.
35. Todd P., Pecauc M. J., Fleschner M. Combined effects of space flight factors and radiation on humans // *Mutat. Res.*—1999.—430.—P. 211—219.
36. Yang T. C., George K., Craise L. M., Durante M. Initiation of oncogenic transformation in mammary epithelial cells by charged particles // *Radiat. Oncol. Investig.*—1997.—5.—P. 134—138.
37. Yang T. C., George K., Johnson A. S., et al. Biodosimetry results from space flight Mir-18 // *Radiat. Res.*—1997.—148, 5 Suppl.—S. 17—23.
38. Yasuda H., Badhwar G. D., Komiyama T., Fujitaka K. Effective dose equivalent on the ninth Shuttle—Mir mission (STS-91) // *Radiat. Res.*—2000.—154.—P. 705—713.
39. Young L. R. Artificial gravity considerations for a Mars exploration mission // *Annals N. Y. Acad. Sci.*—1999.—871.—P. 367—378.

THE SPACE RADIATION: NATURE, BIOLOGICAL EFFECTS AND SHIELDING

Kh. Muradian

The latest findings in origin, biological effects and shielding of the space ionizing radiation (SIR) are reviewed. It is stressed that after the impending implementation of artificial gravity, SIR could become the most serious concern for deep space travelers. SIR is more effective in induction of the genome- and cell-associated damages, compared with the conventional radioactive sources. The shielding of SIR is augmented due to the secondary spallation δ -radiation and possible cooperation with weightlessness and other negative impacts of a space flight. The panspermia concept postulating the existence of living organisms. e. g. bacterial spores, in space and their natural interplanetary transportation is discussed.