

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Straker E., Sensitivity of Neutron Transport in Oxygen to Various Cross-Section Sets. ORNL-TM-2252, 1968.
2. Oblow E. General Sensitivity Theory for Radiation Transport. ORNL-TM-4110, 1973.
3. Bartine D., Oblow E., Mynatt F. Neutron Cross-Section Sensitivity Analysis: a General Approach Illustrated for a Na — Fe System. ORNL-TM-3944, 1972.
4. Bartine D., Oblow E., Mynatt F. Radiation Transport Cross-Section Sensitivity Analysis — a General Approach Illustrated for a Thermonuclear Source in Air. ORNL-TM-4335, 1973.
5. Гермогенова Т. А., Суворов А. П., Уткин В. А. Об оценке влияния погрешностей групповых констант на расчеты нейтронных полей в защитах. Докл. на совещ. комитета МАГАТЭ — ОЭСР по потребности в ядерных данных для расчета защиты, 1976.
6. Proc. of the Specialists Meeting on Sensitivity and Shielding Benchmarks, OECD — OCDE, Paris, 1975.
7. Joint NEA/IAEA Specialist Meeting on Nuclear Data Requirement for Shielding. Vienna, 1976.
8. 5th Intern. Conf. on Reactor Shielding. Knoxville, 1977.
9. Rief H. An Attempt of Sensitivity Calculations in 3D Geometry by Monte-Carlo Techniques. Meeting on Sensitivity Studies and Shielding Benchmark, OECD — OCDE, Paris, 1975.
10. Steinberg H. Correlated Sampling and its Implementation in the SAMCEP code, ORNL — RSIC-33, 1971, p. 161.
11. Масленников М. В. и др. Решение уравнения переноса в задачах о плоскопараллельном слое (программа РОЗ-5). Препринт Ин-та прикл. мат. АН СССР. М., 1972.
12. Вырекий М. Ю. и др. — В кн.: Тезисы докл. Второй всесоюз. науч. конф. по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. М., изд. МИФИ, 1978, с. 10.
13. Базаянц Н. О. и др. АРАМАКО-2F — система обеспечения нейтронными константами расчетов переноса излучения в реакторах и защите. Препринт Ин-та прикл. мат. АН СССР. М., 1976.
14. Вырекий М. Ю. и др. Оптимизация параметров среды по дифференциальным характеристикам поля излучения в некоторых задачах физики защиты реакторов. Препринт № 124. Ин-т прикл. мат. АН СССР. М., 1979.
15. Климанов В. А. и др. Распределение ионизирующих излучений в воздухе. М., Атомиздат, 1979.
16. Бычков В. М. Применение теоретических моделей ядерных реакций для оценки нейтронных сечений. Канд. дис. Киев, 1978.

Поступила в Редакцию 30.07.80

УДК 577.3:539.12.04+629.7

Нормативы радиационной безопасности для космических полетов

ВОРОБЬЕВ Е. И., КОВАЛЕВ Е. Е., ДЕТРОВ В. М., САКОВИЧ В. А.

Большое значение для развития отечественной космонавтики и космической медицины имеет введение в 1975 г. «Временных норм радиационной безопасности при космических полетах» (ВНРБ—75) [1]. Создатели пилотируемых космических кораблей и станций получили практические ориентиры — нормативные уровни радиационного воздействия в зависимости от длительности пребывания человека в космическом пространстве, т. е. вне защитного действия атмосферы Земли. Для космической медицины появляется возможность объединить отдельные системы поддержания жизнедеятельности и безопасности в единый комплекс медицинского обеспечения.

В утвержденных нормативах обобщен опыт обеспечения радиационной безопасности космических полетов. При их разработке использованы клинические материалы о радиационном воздействии в профессиональных условиях, при применении лучевой терапии, результаты комплексного «Хронического эксперимента», моделирующего воздействие космического излучения, результаты исследований биологического действия протонов и многозарядных ионов на ускорителях заряженных частиц, радиобиологические исследования на искусственных спутниках Земли, а также рекомендации Международной комиссии по радиационной защите и нормы радиационной безопасности, применяемые в СССР [2].

«Временные нормы радиационной безопасности» распространяются на все радиационные факторы, которые в условиях космического полета могут воздействовать на экипаж пилотируемого летательного аппарата любого назначения. В соответствии с ВНРБ—75 радиационная безопасность определена как совокупное свойство космического летательного аппарата, экипажа и средств обеспечения полета противостоять комплексному воздействию всех радиационных факторов, приводящих к снижению работоспособности участников космического полета, а также к появлению неблагоприятных последствий после его завершения. Система радиационной безопасности представляет собой комплекс инженерно-технических и медицинских методов, средств и мероприятий, осуществляемых на всех этапах проектирования и создания пилотируемого космического летательного аппарата, во время проведения полета и после его завершения. Основной регламентированной величиной является нормативный уровень радиации — суммарная эквивалентная доза облучения за время космического полета, которая в свете современных представлений не приводит к существенному при выполнении программы полета снижению работоспособности и к появлению неблагоприятных последствий после его завершения. В ВНРБ—75 для радиационной защиты при космических полетах принята еди-

ница эквивалентной дозы бэр и использована известная зависимость коэффициента качества от линейной передачи энергии [2].

Основные источники радиационной опасности — излучения радиационных поясов Земли, солнечное корпускулярное и галактическое космическое излучения, а также ионизирующие излучения бортовых радиоизотопных, ядерных, энергетических и двигательных установок. Радиационное воздействие этих источников в космическом пространстве зависит от программы и условий полета, от конструкции космического летательного аппарата, компоновки обитаемых отсеков, а также обусловлено специфическими характеристиками космических излучений. К их числу следует отнести сложный состав и широкий энергетический спектр космических излучений, пространственно-временные вариации, образование вторичных излучений в защите и ткани, неравномерное распределение поглощенных доз по поверхности и в объеме тела, высокие значения эффективных коэффициентов качества излучения, конечная вероятность превышения установленного значения нормативного уровня излучения за защитой, обусловленная стохастическим характером всплеск солнечного космического излучения.

Рассмотрим основные принципы, использованные при разработке ВНРБ-75. Они заключаются в следующем:

1. Космические полеты человека относятся к виду деятельности с определенным общим уровнем риска.

2. Космические полеты проходят в условиях возможного воздействия многих неблагоприятных факторов, включая излучение.

3. Успешное осуществление программы космического полета определяется условием сокращения работоспособности не более чем в заданных пределах.

4. Система обеспечения безопасности предназначена для сохранения здоровья и жизни участников космических полетов и ограничения риска неблагоприятных последствий.

5. Генетические эффекты действия космической радиации практически исключаются ввиду относительно малого числа участников космических полетов в предстоящий период.

В ВНРБ-75 использованы некоторые исходные радиобиологические предпосылки. Во-первых, при суммарной дозе стандартного излучения $\sim 70-100$ рад ($1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}$) и мощности дозы не более 20 рад/год не достигаются дозы, обуславливающие формирование клинически выраженных проявлений лучевого заболевания даже со стороны наиболее поражаемых органов и систем. Во-вторых, при суммарной дозе стандартного излучения $\sim 100-150$ рад и мощности дозы $20-50 \text{ рад/год}$ у $20-30\%$ лиц могут возникать стертые проявления заболевания. Сроки

Таблица 1

Нормативные уровни радиации

Т, мес	НУР, бэр за полет	Т, мес	НУР, бэр за полет
1	50	6	110
2	65	8	125
3	80	10	140
4	90	12	150
5	100		

формирования синдрома затягиваются до 3—5 лет от начала облучения. Симптомы поражения выражены слабо. В-третьих, при суммарной дозе стандартного излучения $> 150-400$ рад и мощности дозы $> 100 \text{ рад/год}$ у $80-90\%$ лиц развивается клинический синдром хронической лучевой болезни. Формирование синдрома происходит в первые 1-2 года. Нарушения, требующие госпитализации по клиническим показателям, встречаются в единичных случаях [3].

Для проектных расчетов защиты экипажей различных космических кораблей и станций в ВНРБ-75 установлены нормативные уровни радиации (НУР) в зависимости от длительности полета (табл. 1). Эти значения относятся к равномерному общему облучению всего тела или к воздействию на костный мозг. В расчетах защиты эффективную глубину залегания костного мозга принимают равной 5 см ткани. В случае неравномерного облучения тела используют множители: 3 для кожи и 5 для хрусталика глаза. Расчет защиты проводят так, чтобы доза облучения любого из этих органов не превышала соответствующего значения НУР. Например, защита экипажа от радиации при длительности его пребывания в космосе 5 мес должна быть такой, чтобы доза облучения не превышала 100 бэр на все тело (равномерное облучение) или на костный мозг, 300 бэр на кожу и 150 бэр на хрусталик глаза.

Наряду с ограничением уровня радиационного воздействия на экипаж за время полета в ВНРБ-75 содержатся также требования к надежности защиты от космической радиации. При этом надежность защиты пилотируемого летательного аппарата определена как «вероятность непревышения нормативного уровня радиации в условиях данного полета». Указывается, что требования к надежности защиты от радиации при космических полетах устанавливаются в зависимости от назначения пилотируемого летательного аппарата, однако во всех случаях надежность защиты не должна быть ниже 0,99 при доверительной вероятности 0,90. Это означает, например, что для продолжительности полета 1 год риск превышения норматив-

ного уровня радиации, составляющего не более 150 бэр за такой полет, не должен превышать 1%. Таким образом, вследствие стохастического характера вспышек солнечного космического излучения приходится ограничивать вероятность превышения нормативного уровня радиации за защитой, вводя дополнительное условие — требование к надежности защиты.

Неопределенность исходных данных для расчетов защиты, а также неопределенности, связанные с условиями эксплуатации данного летательного аппарата и т. п., отражаются степенью риска заказчика (вероятность реализации во время данного космического полета ситуаций, при которых надежность защиты от радиации оказывается ниже требуемого уровня) или соответствующим значением доверительной вероятности. В качестве примера реализации такого подхода рассмотрим оценку радиационной опасности для экипажа орбитальной станции, состоящей из рабочего отсека (РО) и радиационного убежища (РУ), имеющих защиту толщиной 1 и 5 г/см² алюминия соответственно. Предположим, что станция функционирует на круговой орбите с наклоном 70°, высота полета может изменяться от 350 до 600 км, а эффективное время полета составляет 1 год. Для оценки опасности должен быть сопоставлен риск превышения нормативного уровня радиации и различные варианты выполнения полетной программы.

Результаты расчетов уровня радиационного воздействия (табл. 2) [4] показывают, что хрусталик глаза является органом, определяющим радиационную опасность.

Для снижения риска превышения НУР толщина защиты глаза должна быть увеличена (можно использовать локальную защиту в виде очков). Во время солнечных протонных вспышек космонавты должны находиться в РУ. Это поз-

волит значительно уменьшить риск превышения НУР для кроветворных органов. Если космонавты находятся в РУ во время всех возможных солнечных вспышек, этот риск уменьшится до 3%, но будет превышать установленный уровень (1%). Следовательно, необходимо увеличить толщину защиты РО или существенно изменить программу полета, в частности снизить высоту орбиты примерно до 400 км. При этом уровень риска для кроветворных органов не превысит установленного значения. В ВНРБ—75 отражены определенные модельные представления о действии радиации на живой организм, которые, на наш взгляд, заслуживают обсуждения в целях дальнейшего совершенствования.

Дальнейшее развитие проблемы нормирования радиационного воздействия в космосе может быть основано на оценках надежности функционирования космонавта и на использовании этого понятия в качестве критерия оценки радиационной опасности. При этом можно учесть как различные реакции организма на облучение, так и значимость их для безопасности космонавтов. Исходными данными являются модельное описание радиационной обстановки в космосе, методики и результаты оценок эффективной дозы облучения во время полета и функции распределения вероятности различных лучевых реакций по этой дозе. Степень радиационной опасности может оцениваться вероятностью неблагоприятного последствия, рассчитываемой методом Монте-Карло. Для определения эффекта радиационного воздействия в данном случае необходимо расшифровать понятие «неблагоприятное воздействие» (например, летальный исход, невыполнение этапа программы и т. п.) и регламентировать уровень риска его реализации. Такой подход позволит при оценках радиационной опасности использовать понятия и методы теории надежности и рассматривать систему радиационной безопасности как одну из компонентов системы обеспечения жизнедеятельности экипажа.

Таблица 2

Уровень радиационного риска для орбитальной станции при постоянном пребывании космонавта в данном отсеке, %

Высота орбиты, км	Хрусталик глаза		Кроветворные органы	
	РО	РУ	РО	РУ
350	40	0,1	0,9	0,05
600	40	0,3	7	0,8

Примечание. Глубина залегания принята равной 0,5 г/см² ткани для хрусталика глаза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Временные нормы радиационной безопасности при космических полетах (ВНРБ — 75). М., Минздрав, 1976.
2. Нормы радиационной безопасности НРБ — 76. М., Атомиздат, 1978.
3. Гуськова А. К., Байсоголов Г. Д. Лучевая болезнь человека. М., Медицина, 1971.
4. Gurovski N. N., Kovalev E. E., Petrov V. M. Radiation protection for manned orbital stations. Intern. Astronautical Federation XXVIIIth Congr., Prague, 25 Sept. 1977. Report 77-A39.

Поступила в Редакцию 29.10.80