

УДК 613.693 + 614.876

РАДИАЦИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ В ОРБИТАЛЬНЫХ И МЕЖПЛАНЕТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЁТАХ: МОНИТОРИНГ И ЗАЩИТА

© 2019 г. А. С. Самойлов, И. Б. Ушаков, *В. А. Шуршаков

ФГБУН «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А. И. Бурназяна», г. Москва; *ФГБУН «Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН», г. Москва

В обзоре представлены современные данные об основных источниках радиационного воздействия на человека в космосе: галактические космические лучи, радиационные пояса Земли и солнечные космические лучи. Дозы радиации на космической станции в ~200 раз больше, чем при среднем фоне облучения человека в обычных земных условиях. За год полета на Международной космической станции космонавт получает дозу, примерно в 10 раз превышающую (200 мЗв/год) пределы доз работника атомной промышленности. Внутри тела космонавта за счет «самоэкранированности» органов происходит дальнейшая трансформация дозового поля космической радиации, которая должна быть учтена для оценки доз на органы и эффективной дозы. С целью сопоставления с нормативами необходимо измерять дозы на критические органы, для чего и используются тканезквивалентные фантомы-манекены. Рассмотрены измерения дозы в космических экспериментах, облучение в скафандре во время внекорабельной деятельности, использование физических способов защиты космонавтов, а также радиационные воздействия на Луне и Марсе. За средний «выход» длительностью ~5 часов при невозмущенных условиях космонавт дополнительно получает 0,3–0,5 мЗв, что близко к среднесуточной дозе внутри станции. Космическая радиация на поверхности Луны более жесткая, чем, например, на Марсе. Радиационная нагрузка на поверхности Марса составляет в среднем 0,7 мЗв/сут. Это сопоставимо со среднесуточной дозой на МКС 0,3–0,8 мЗв/сут. На Луне доза может вдвое превышать уровень, зафиксированный на Марсе.

Ключевые слова: радиация, космические полёты, дозовые пределы и ограничения, мониторинг облучения, средства защиты

RADIATION EXPOSURE DURING THE ORBITAL AND INTERPLANETARY SPACEFLIGHTS: MONITORING AND PROTECTION

A. S. Samoylov, I. B. Ushakov, *V. A. Shurshakov

A. I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Centre (FMBC, Moscow; *Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Science (IBMP RAS), Moscow, Russia

This review presents actual knowledge and recent findings on the main sources of radiation exposure on human in space: galactic cosmic rays, Earth radiation belts and solar cosmic rays. Doses of radiation on the space station are in ~200 times higher than the average human exposure in ordinary terrestrial conditions. During yearlong flight on the International space station (ISS) astronaut receives a dose, which exceeds the limits in approximately 10 times (200 mSv/year) for nuclear industry worker. There is a further transformation of cosmic radiation field inside the body of the astronaut at the expense of organs' "self-shielding". These changes should be taken into account to estimate dose exposure on organs and effective dose. In order to compare with the standards the doses for the critical organs must be measured with the help of tissue-equivalent phantoms dummies. Authors consider such problems as phantom dose measurement in space experiments; irradiation through the spacesuit during the extravehicular activity; application of physical methods for the astronauts' protection and radiation exposure on the Moon and Mars. For the average "exit" with duration of ~5 hours with undisturbed conditions the astronaut receives a further 0.3-0.5 mSv, which is close to the average dose inside the station. Cosmic radiation on the Moon's surface is severer than, for example, on Mars. The radiation load on the surface of Mars is average 0.7 mSv/day. This is comparable with a daily dose on ISS 0.3-0.8 mSv/day. The Moon dose may twice exceeds the level seen on Mars.

Key words: radiation, spaceflights, dose limits and restrictions, monitoring of the irradiation, means of protection

Библиографическая ссылка:

Самойлов А. С., Ушаков И. Б., Шуршаков В. А. Радиационное воздействие в орбитальных и межпланетных космических полётах: мониторинг и защита // Экология человека. 2019. № 1. С. 4–9.

Samoylov A. S., Ushakov I. B., Shurshakov V. A. Radiation Exposure During the Orbital and Interplanetary Spaceflights: Monitoring and Protection. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology]. 2019, 1, pp. 4-9.

В ходе космических полетов живые системы непрерывно подвергаются радиационному облучению, во много раз превышающему естественный наземный фон. Доза облучения зависит от длительности полета, параметров орбиты, фазы цикла солнечной активности, таких факторов космической погоды, как геомагнитная обстановка и проникновение на трассу полета заряженных частиц высокой энергии, обусловленных солнечной активностью, а также от условий

защищенности (например, оболочкой космического аппарата или скафандром).

В конце 50-х годов прошлого века на первых же российских и американских спутниках были открыты радиационные пояса Земли — области повышенной «захваченной» магнитным полем радиации в околоземном пространстве. При первых же пилотируемых полетах проводились измерения доз космической радиации в отсеках пилотируемых космических ко-

раблей. При спокойной радиационной обстановке, когда нет солнечных частиц высокой энергии, различие дозовых нагрузок не превышает полутора-двух раз, однако при радиационных возмущениях в околоземном пространстве перепады доз по отсекам могут достигнуть десяти и более раз, что связано с энергетическими спектрами частиц и особенностями защищенности отсеков. Основные источники радиационной опасности в космосе представлены на рис. 1.



Рис. 1. Основные источники радиационной опасности в космосе

С учетом неоднородности дозового поля на космической станции и необходимости определять суммарную дозу, полученную за весь полет, для каждого космонавта предусмотрен индивидуальный дозиметр, который необходимо в течение всего полета носить в специальном кармане полетного костюма. Дальнейшие исследования показали, что внутри тела космонавта за счет «самоэкранированности» органов происходит дальнейшая трансформация дозового поля космической радиации, которая должна быть учтена для оценки доз на органы и так называемой эффективной дозы [1–9].

Радиация в космосе и фантомы-манекены

Дозы радиации на космической станции в ~200 раз

больше, чем при среднем наземном фоне облучения человека в обычных земных условиях. За год полета на Международной космической станции (МКС) космонавт получает дозу, примерно в 10 раз превышающую (200 мЗв/год) нормы радиационной безопасности для работника атомной промышленности (в среднем 20 мЗв/год), что все же допустимо, поскольку современные российские нормативы лимитируют дозу на кроветворные органы космонавтов в размере 500 мЗв/год [4]. Для сопоставления с нормативами необходимо измерять дозы на критические органы: желудочно-кишечный тракт, кроветворную систему, центральную нервную систему и т. п., для чего и используются тканеэквивалентные фантомы-манекены типа фантома «Рэндо» или шарового фантома, как в российском космическом эксперименте «Матрешка-Р». Фантомы-манекены перспективны для использования при измерении динамики накопления дозы в теле космонавта в спокойных и «возмущенных» условиях; других способов экспериментального определения распределения дозы по телу космонавта нет.

На рис. 2 показаны примеры фантомов для определения распределения доз в теле космонавтов МКС.

Радиация при работе в скафандре

Масса скафандра для работы в открытом космосе порядка 100 кг (много меньше массы модуля космической станции, составляющей порядка 10 т), и защита от радиации слабее, чем внутри станции. В результате при работе в скафандре средняя мощность дозы на поверхности тела примерно в ~5 раз больше, чем внутри станции и составляет уже 1 000-кратный земной фон. За средний «выход» длительностью ~5 часов при невозмущенных условиях космонавт дополнительно получает 0,3–0,5 мЗв, что близко к среднесуточной дозе внутри станции. Таким образом, каждый выход в открытый космос с точки зрения воздействия космической радиации эквивалентен одному «лишнему» дню на станции.

Все приведенные выше оценки относятся только к невозмущенным радиационным условиям, когда



Рис. 2. Примеры тканеэквивалентных фантомов космического эксперимента «Матрешка-Р»

нет ни солнечных протонных событий, ни сильных магнитных бурь. Магнитные бури могут увеличить потоки электронов в околоземном пространстве в десятки и сотни раз, и если стенки отсеков станции их практически полностью поглотят, то для работы в скафандре это может быть достаточно опасно с точки зрения облучения кожи и хрусталика глаза.

Рекомендации специалистов по радиационной безопасности позволяют минимизировать воздействие космической радиации при внекорабельной деятельности (ВКД) как за счет выбора оптимального времени начала ВКД, так и за счет такого явления, как анизотропия захваченной магнитным полем Земли космической радиации. Это явление приводит к тому, что на некоторых участках орбиты (в зоне Южно-Атлантической магнитной аномалии) потоки частиц с запада существенно больше, чем с востока. В этом случае при ВКД можно использовать экранирование самим телом станции или просто, если позволяет задача, поставленная космонавту, повернуться к западному направлению спиной, так как защита скафандра со стороны спины максимальна (рис. 3).

Максимальная доза, полученная неким условным космонавтом, может быть оценена, исходя из суммарной длительности его полетов и числа выходов в открытый космос, например, если длительность 700 суток и 10 выходов в открытый космос, то доза составит $700 \times 0,5 + 10 \times 0,5 = 350 + 5 = 355$ мЗв. С учетом доз, получаемых при медицинских предполетных обследованиях, необходимо добавить еще 10–50 мЗв. Согласно нормативам, предельная доза за карьеру космонавта — 1 000 мЗв, но и для наземных специалистов-атомщиков рассчитанная доза существенно превышена. Космические туристы

за недельный полет получают не более 4–5 мЗв. Таким образом, с учетом современных нормативов по космической радиации суммарное пребывание на станции на низкой околоземной орбите не может превысить 4 года.

Шторка защитная в каюте служебного модуля МКС

Исторические особенности проектирования модулей МКС привели к тому, что в среднем суточная доза в американской каюте (0,3 мЗв/сут) в 2 раза ниже, чем в российской (0,6 мЗв/сут). Для снижения доз при годовом полете для дополнительной защиты от космической радиации рекомендовано применение изделия «Шторка защитная», которое состоит из пропитанных водой гигиенических салфеток и полотенец, размещаемых в каюте служебного модуля в специальной укладке в 4 слоя (рис. 4). Расчетные и экспериментальные данные подтверждают защитный эффект — доза для космонавта в каюте при наличии шторки снижается на 20–30 % и более, что дает ощутимый эффект по снижению доз за всю экспедицию.

Радиация на Луне

Создание обитаемой лунной базы планируется после 2030-го года. Космическая радиация на поверхности Луны более жесткая, чем, например, на Марсе. По данным, полученным с марсохода «Кьюриосити» [4, 10], радиация на поверхности Марса составляет в среднем 0,7 мЗв/сут. Это сопоставимо со среднесуточной дозой на МКС 0,3–0,8 мЗв/сут. На Луне доза может вдвое превышать уровень, зафиксированный на Марсе. Это связано с несколькими факторами. Во-первых, Луна ближе к Солнцу, чем



Рис. 3. При ориентации космонавта «спиной к западу» дозы при внекорабельной деятельности снижаются

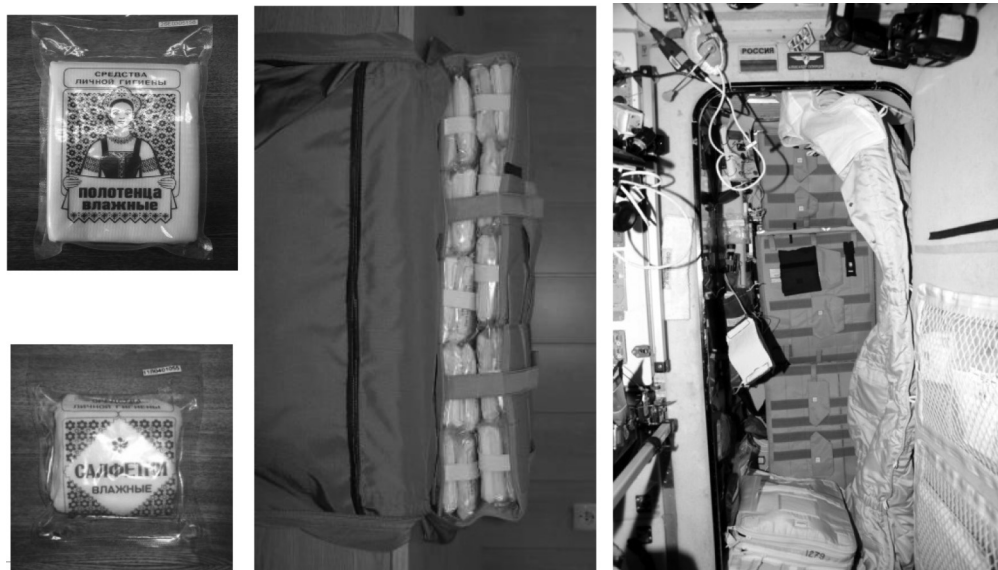


Рис. 4. Шторка защитная в каюте служебного модуля МКС

Марс, и доза от солнечных энергичных частиц на поверхности Луны с учетом разницы расстояния от Солнца в два-три раза больше, чем на Марсе. Во-вторых, на Марсе в отличие от Луны все же есть разреженная атмосфера толщиной ~ 20 г/см², которая ослабляет как галактическую, так и солнечную радиацию. И в-третьих, на Марсе имеется вода (в виде льда в составе грунта и т. п.), которая эффективно замедляет вторичные нейтроны, появляющиеся после бомбардировки космическими частицами марсианского грунта, т. е. лед уменьшает выход вторичных нейтронов на поверхность.

В итоге если среднесуточная доза на Луне составляет примерно 1,4 мЗв, то за полгода уровень радиации достигнет 250 мЗв. Столько же получают члены экипажа на МКС в течение годового полета. Однако необходимо иметь укрытие — радиационное убежище, в котором обитатели лунной базы смогли бы переждать солнечные протонные события, например, естественные лунные пещеры или надувные лунные модули, покрытые сверху реголитом.

Радиация на Марсе

Измерения доз на трассе полета к Марсу, а потом и на его поверхности, проведенные учеными НАСА в 2012–2013 годах прибором RAD, позволили уточнить имеющиеся расчетные оценки: на трассе полета доза была 1,8 мЗв/сут, а на поверхности Марса — 0,7 мЗв/сут, за весь полет — более 1 Зв.

Американские астронавты, побывавшие на Луне, получали за весь полет, длившийся 8–12 суток, сравнительно небольшие дозы, оцениваемые ~ 10 мЗв, что обусловлено отсутствием солнечных энергичных частиц. Однако в августе 1972 года произошло мощное солнечное протонное событие, которое привело бы к облучению дозами, близкими к летальным, при нахождении астронавтов на поверхности Луны или в процессе полета вне магнитосферы Земли. Отметим,

что расстояние до Луны — 60 земных радиусов, а магнитосфера Земли простирается не далее 10 радиусов, на немагнитосферном участке космонавты не защищены от мощных солнечных энергичных частиц.

И на Луне, и на Марсе необходима автономная система радиационного контроля, работающая оперативно и независимо от наличия связи с Землей. Должны не только фиксироваться полученные космонавтами индивидуальные дозы, но и заблаговременно выдаваться сигналы об опасности — о начале мощной солнечной вспышки, что позволит оперативно уходить в радиационное убежище. Возможно, придется использовать и медицинские препараты-радиопротекторы. Прототип такой автономной системы разработан российскими специалистами и в настоящее время размещен в служебном модуле российского сегмента МКС.

Опасна ли доза в 1 Зв, ожидаемая за полет на Марс и обратно при нынешних ракетных двигателях? В российских космических нормативах 1 Зв — это лимит дозы за карьеру космонавта (кстати, такой же лимит и у персонала ядерной отрасли). Но дело в том, что этот лимит установлен без учета возраста и пола и представляет собой некую усредненную оценку для принятия решений о возможности продолжения «карьеры» на Земле или в космосе. Практически этот лимит недостижим: чтобы приблизиться к нему на ядерном объекте, надо отработать более 50 лет или отлетать на космической станции 5 лет. При более точном радиобиологическом подходе нормированию подлежит не доза, а радиационный риск, например, как принято в НАСА на уровне 3 % дополнительно-го канцерогенного риска от космической радиации. С учетом того, что при полете на Марс дозовый лимит 1 Зв будет набран с гарантией, специалисты НАСА, проводя более точные оценки, приходят к выводу, что при 1 Зв канцерогенный риск будет неоправданно высок: 5 % вместо нормируемых 3 %. Казалось бы,

все просто: теперь надо снизить допустимый дозовый лимит (например, не 1 000, а 666 мЗв за карьеру), и это устойчивая тенденция последних десятилетий при нормировании радиационного воздействия, и тогда-то можно лететь к другим планетам. Но проблема в том, что при современном уровне развития ракетной техники и космических технологий снизить дозу при полете на Марс весьма сложно. И с такими «новыми» нормативами, планирование марсианской миссии остается весьма проблематичным...

Как быть человечеству, остаться навсегда в своей «колыбели» или лететь к далеким мирам — это предмет отдельного рассмотрения.

Радиационный мониторинг в ходе космических полетов с участием живых систем требует особого методического подхода для определения биологически значимых характеристик поля излучения, а также учета сложного состава излучения с возможными сильными перепадами дозовых величин. Полученные на МКС результаты об эффективных дозах радиации и апробированные методы снижения радиационного воздействия, наряду с результатами об ожидаемых радиобиологических эффектах космического излучения, могут быть использованы при планировании дальних и длительных космических полетов за пределами магнитосферы Земли.

Авторство

Самойлов А. С. внес существенный вклад в общую концепцию, анализ и перспективы будущего использования результатов работы для обеспечения радиационной безопасности дальних полетов, окончательно утвердил присланную в редакцию рукопись; Ушаков И. Б. внес существенный вклад в концепцию, дизайн и анализ представленных данных, подготовил первый вариант статьи; Шуршаков В. А. внес существенный вклад в получение данных космических экспериментов, подготовил первый вариант статьи.

Благодарности

Авторы безмерно благодарны кандидату физико-математических наук Владиславу Михайловичу Петрову, многие годы руководившему отделом радиационной безопасности пилотируемых космических полетов Института медико-биологических проблем, за органичное и постоянное руководство экспериментально-теоретическими работами по оценке радиационных рисков человека в космосе.

Авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов.

Самойлов Александр Сергеевич — ORCID 0000-0002-9241-7238; SPIN 3771-4848

Ушаков Игорь Борисович — ORCID 0000-0002-6988-9261; SPIN 7120-1771

Шуршаков Вячеслав Александрович — ORCID 0000-0003-3361-4255; SPIN 1839-2847

Список литературы

1. Григорьев Ю. Г., Ушаков И. Б., Красавин Е. А., Давыдов Б. И., Шафиркин А. В. Космическая радиобиология за 55 лет (к 50-летию ГНЦ РФ-ИМБП РАН) / Российская академия наук, Институт медико-биологических проблем и др. М.: Экономика, 2013. 303 с.

2. Давыдов Б. И. Авиакосмическая радиобиология:

основные итоги, люди, события / под ред. И. Б. Ушакова. М.; Воронеж: Истоки, 2007. 164 с.

3. Карташов Д. А., Толочек Р. В., Шуршаков В. А., Ярманова Е. Н. Расчет радиационных нагрузок в отсеке космической станции при использовании дополнительной защиты // Авиакосмическая и экологическая медицина, 2013. Т. 47, № 6. С. 61–66.

4. Санитарные правила и нормы. СанПиН 2.6.1. 44-03-2004. Методические указания МУ 2.6.1. 44-03-2004. Ограничение облучения космонавтов при околоземных космических полетах (ОКОКП-2004). М.: Федеральное управление «Медбиоэкстрем», 2004.

5. Сәнецкий А. О., Ушаков И. Б., Сәнецки Н. В., Штемберг А. С., Косицын Н. С., Тимофеев Н. Н. Радиационная нейробиология дальних космических полетов // Успехи современной биологии. 2017. Т.137, № 2. С. 165–194.

6. Уйба В. В. Роль ФМБА России в программе освоения космоса // Медицина экстремальных ситуаций. 2014. № 4. С. 6–10.

7. Kodaira S., Tolochek R. V., Ambrozova I., Kawashima H., Yasuda N., Kurano M., Kitamura H., Uchihori Y., Kobayashi I., Hakamada H., Suzuki A., Kartsev I. S., Yarmanova E. N., Nikolaev I. V., Shurshakov V. A. Verification of shielding effect by the water-filled materials for space radiation in the International Space Station using passive dosimeters // Advances in Space Research. 2014. Vol. 53 (1). P. 1–7.

8. Puchalska M., Bilski P., Berger T., Hajek M., Horwacik T., Körner C., Olko P., Shurshakov V., Reitz G. NUNDO: a numerical model of a human torso phantom and its application to effective dose equivalent calculations for astronauts at the ISS // Radiation and environmental biophysics. 2014, Nov. Vol. 53 (4). P. 719–727.

9. Shurshakov V., Tolochek R. V., Kartsev I. S., Petrov V. M., Nikolaev I. V., Moskalyeva S. I., Lyagushin V. I. Study of dose distribution in a human body in International space station compartments with the tissue-equivalent spherical phantom // J. of Radiat Research. 2014. Vol. 55. P. 61–62.

10. Zeitlin C., Hassler D. M., Cucinotta F. A., Ehresmann B., Wimmer-Schweingruber R. F., Brinza D. E., Kang S., Weigle G., Böttcher S., Böhm E., Burmeister S., Guo J., Köhler J., Martin C., Posner A., Rafkin S., Reitz G. Measurements of energetic particle radiation in transit to Mars on the Mars Science Laboratory // Science. 2013. Vol. 340. P. 1080–1084.

References

1. Grigor'ev Yu. G., Ushakov I. B., Krasavin E. A., Davydov B. I., Shafirkin A. V. *Kosmicheskaya radiobiologiya za 55 let (k 50-letiyu GNTs RF-IMBP RAN* [Space radiobiology for 55 years (to 50-th anniversary of SSC RF - IBMP RAS)]. Russian Academy of Sciences (RAS), Institute of biomedical problems, etc. Moscow, Economica Publ., 2013, 303 p.

2. Davydov B. I. *Aviakosmicheskaya radiobiologiya: osnovnye itogi, lyudi, sobytiya* [Aerospace radiobiology: main results, people, events]. Ed. by I. B. Ushakov. Moscow, Voronezh, Istoki Publ., 2007, 164 p.

3. Kartashov D. A., Tolochek R. V., Shurshakov V. A., Yarmanova E. N. Calculation of radiation loads in a compartment of the space station when using extra protection. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina* [Aerospace and environmental medicine], 2013, 47 (6), pp. 61-66. [In Russian]

4. Sanitary rules and norms. SanPiN 2.6.1. 44-03-2004. Guidelines MU 2.6.1. 44-03-2004. Limit exposure of astronauts in near-earth space flights (OOKOK-2004). Moscow, The Federal office "Medbioekstrem", 2004. [In Russian]

5. Sapetskiy O. A., Ushakov I. B., Sapetski N. V., Stenberg S. A., Kositsyn N. S., Timofeev N. N. Radiation neurobiology of long-space flights. *Uspekhi sovremennoi biologii* [Successes of modern biology]. 2017, 137 (2), pp. 165-194. [In Russian]

6. Uiba V. V. The Role of the FMBA of Russia in the space exploration program. *Medsina ekstremal'nykh situatsii* [Medicine of emergency situations]. 2014, 4, pp. 6-10. [In Russian]

7. Kodaira S., Tolochek R. V., Ambrozova I., Kawashima H., Yasuda N., Kurano M., Kitamura H., Uchihori Y., Kobayashi I., Hakamada H., Suzuki A., Kartsev I. S., Yarmanova E. N., Nikolaev I. V., Shurshakov V. A. Verification of shielding effect by the water-filled materials for space radiation in the International Space Station using passive dosimeters. *Advances in Space Research*. 2014, 53 (1), pp. 1-7.

8. Puchalska M., Bilski P., Berger T., Hajek M., Horwacik T., Körner C., Olko P., Shurshakov V., Reitz G. NUNDO: a numerical model of a human torso phantom and its application to effective dose equivalent calculations

for astronauts at the ISS. *Radiation and environmental biophysics*. 2014, Nov., 53 (4), pp. 719-27.

9. Shurshakov V., Tolochek R. V., Kartsev I. S., Petrov V. M., Nikolaev I. V., Moskalyeva S. I., Lyagushin V. I. Study of dose distribution in a human body in International space station compartments with the tissue-equivalent spherical phantom. *J. of Radiat Research*. 2014, 55, pp. 61-62.

10. Zeitlin C., Hassler D. M., Cucinotta F. A., Ehresmann B., Wimmer-Schweingruber R. F., Brinza D. E., Kang S., Weigle G., Böttcher S., Böhm E., Burmeister S., Guo J., Köhler J., Martin C., Posner A., Rafkin S., Reitz G. Measurements of energetic particle radiation in transit to Mars on the Mars Science Laboratory. *Science*. 2013, 340, pp. 1080-1084.

Контактная информация:

Ушаков Игорь Борисович — академик РАН, доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр имени А. И. Бурназяна» (ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России)

Адрес: 123182, г. Москва, ул. Живописная, д. 46

E-mail: iushakov@fmbcfmba.ru; ibushakov@gmail.com