

УДК 537:598.261.7+612.014.426

БИОЛОГИЧЕСКАЯ УГРОЗА – УГРОЗА НАРУШЕНИЯ ПЛАНЕТАРНОГО КАРАНТИНА КАК РЕЗУЛЬТАТ ОСВОЕНИЯ ЧЕЛОВЕКОМ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

© 2020 г. В. Н. Сычев^{1,*}, Н. Д. Новикова¹, С. В. Поддубко¹,
Е. А. Дешева¹, академик РАН О. И. Орлов¹

Поступило 15.10.2019 г.
После доработки 15.10.2019 г.
Принято к публикации 15.10.2019 г.

Представлены результаты экспериментов, проводимых в рамках Российской научной программы на внешней стороне Международной космической станции, по оценке влияния условий космического пространства на споровые формы бактерий и микроскопических грибов. Установлено, что в этих экстремальных условиях микроорганизмы могут не только выживать, но и сохранять способность к репродукции. При этом у большинства микроорганизмов наблюдалась активизация биохимической активности, повышалась устойчивость к антимикробным препаратам, в частности к антибиотикам.

Ключевые слова: биологическая угроза, освоение космического пространства, биологические организмы, культуры микроорганизмов, межпланетные полёты, орбитальные станции, планетарный карантин

DOI: 10.31857/S2686738920010242

Рост народонаселения Земли, промышленное и сельскохозяйственное освоение природных ресурсов оказывают всё большее давление на экосистемы Земли, грозя их существованию. Человечество ищет пути выхода из создавшейся ситуации, однако решить все проблемы без освоения космического пространства, скорее всего, не удастся. Как во время промышленной революции потребовалось освоение новых земель, так и постиндустриальное развитие цивилизации потребует выхода за пределы Земли. Однако при этом появляются новые, ранее неизвестные риски и угрозы. К ним относятся и признаваемые мировым сообществом как вызовы, требующие повышенного внимания, космические угрозы, одна из которых биологическая угроза – угроза нарушения планетарного карантина.

Биологическая угроза связана не только с возможным проникновением в биосферу Земли инопланетной биологической материи, но и с возможной трансформацией собственно земной биологической материи, находящейся в состоянии покоя, при её нахождении в условиях косми-

ческого пространства и/или в активном состоянии на борту межпланетных космических аппаратов и на планетарных обитаемых базах.

Способностью к той или иной форме покоя, обеспечивающей способность выживать в условиях, несовместимых с активной жизнедеятельностью, обладает широкий спектр организмов от бактерий до позвоночных [1–5]. Наличие устойчивых форм жизни может стать причиной не санкционированного антропогенного распространения земных организмов на другие небесные тела и, наоборот, инфицирования Земли модифицированными формами неземных организмов.

В рамках Российской научной программы внутри и на внешней стороне Российского сегмента (РС) Международной космической станции (МКС) проводились и проводятся космические эксперименты (КЭ) “Растения-Семена”, “Биориск-МСВ”, “Аквариум”, “Биориск-МСН”, “Экспоз-Р”, “Экспоз-Р2” по экспозиции разной длительности покоящихся форм организмов. На внешней стороне РС МКС в рамках КЭ “Тест” с поверхности станции были отобраны пробы и проанализированы на наличие в них биологической материи.

Результаты КЭ “Биориск-МСН” впервые показано, что при длительном пребывании в экс-

¹ Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем Российской Академии наук, Москва, Россия

*e-mail: vnsychev@imbp.ru

тремальных условиях космического пространства на внешней стороне РС МКС споры бактерий и грибов сохраняют свою жизнеспособность [4, 6–9].

Основными внешними факторами, которые оказывали воздействие на споры микроорганизмов, были вакуум, радиация и температура. Важно отметить, что даже после пребывания в течение 18 месяцев в таких, не самых “жестких” условиях, у большинства штаммов бактерий наблюдалась активизация биологической и биохимической активности, в частности возрастание ДНКазной и РНКазной активности, отмечены и существенные изменения в стабильности биохимических показателей, характеризующих их видовую принадлежность. Помимо изменений в стабильности биохимических показателей у штамма *B. licheniformis*-ВКМ-711Д после экспонирования в условиях космического пространства на околоземной орбите повысилась устойчивость к антибиотикам [8].

В КЭ “Биориск-МСН”, проводившемся в период с ноября 2008 по март 2011 года, одним из самых существенных факторов, повлиявших на выживаемость спор бактерий, была температура, которая достигала 90°C и более. Однако несмотря на это, после 31-го месяца экспозиции были обнаружены выжившие споры штамма *Bacillus licheniformis*-24 [9].

В период с 2008 по 2016 гг. совместно с Европейским космическим агентством (ЕКА) на внешней стороне РС МКС были реализованы КЭ “Экспоуз-Р” и “Экспоуз-Р2”. Оборудование, использованное КЭ “Экспоуз-Р” и “Экспоуз-Р2”, позволяло экспонировать споры микроорганизмов как в темноте, так и при воздействии на них солнечного излучения.

В КЭ “Экспоуз-Р” в результате проведенных исследований показано, что споры бактерий рода *Bacillus*, подвергшиеся 100%-му облучению солнечным ультрафиолетовым (УФ) излучением, погибли. Стократное уменьшение солнечного УФ-излучения позволило 1% спор бактерий *Bacillus pumilus*-25 и *Bacillus subtilis*-2335/105 сохранить жизнеспособность. У сохранивших жизнеспособность бактерий потеряна способность продуцировать фермент ДНК-азу, а РНК-азная активность в большинстве случаев снижалась в 1.5–4 раза. Сравнительный анализ чувствительности к антибиотикам у опытных и контрольных штаммов выявил у некоторых бактерий тенденцию к снижению резистентности к испытываемым препаратам, а у двух штаммов *Bacillus licheniformis*-24 и *Bacillus pumilus*-25 было отмечено увеличение резистентности к препарату канамицин [10].

Исследования грибной микрофлоры показали, что споры штаммов *Aspergillus versicolor* и *Aspergillus sydowii* выжили даже при 100%-м облучении солнечным УФ-излучением. Отмечено по-

вышение чувствительности к антигрибковым препаратам по мере уменьшения дозы УФ-облучения у штаммов *Aspergillus versicolor*, *Penicillium expansum* и *Penicillium aurantiogresium*. Чувствительность к антигрибковым препаратам у штамма *Aspergillus sydowii* имела противоположную тенденцию [10].

Таким образом, у большинства культур была выявлена тенденция к устойчивости к антигрибковым препаратам по мере уменьшения воздействия УФ-излучения. Исключением являлся штамм *Aspergillus sydowii*, у которого отмечена обратная динамика.

В КЭ “Экспоуз-Р2” на всех “окнах”, через которые проникало солнечное излучение, были установлены фильтры, пропускавшие от 0.1 до 1.0% УФ-излучения. Результаты полетного эксперимента свидетельствуют о том, что выжили только споры штамма *Bacillus licheniformis*-24 в ячейках, где были установлены фильтры, пропускающие 0.1% солнечного УФ-излучения. Споры штаммов *Bacillus pumilus*-25 и *Bacillus licheniformis*-24 в ячейках, где были установлены фильтры, пропускающие 1% солнечного УФ-излучения, полностью погибли [11].

Помимо оценки выживаемости спор у штамма *Bacillus licheniformis*-24 исследовали антибиотикорезистентность. Выбранные антибиотики были показательными именно для бактерий рода *Bacillus*. Полученные результаты по оценке резистентности к антибиотикам, определяемой по величине зоны задержки роста культуры вокруг дисков, представлены на рис. 1 [11].

Сравнительный анализ, как и в КЭ “Биориск-МСН”, выявил однонаправленную тенденцию к усилению устойчивости к испытываемым антибиотикам у бактерий, споры которых подвергались воздействию факторов космического пространства.

Споры грибов, прежде всего аспергиллов, оказались жизнеспособными после экспонирования в космическом пространстве. Все полётные штаммы грибов стойки к действию амфотерицина В, у штамма *Aspergillus sydowii* выявлена минимальная чувствительность к итраконазолу [11].

В результате проведения КЭ “Тест” было установлено, что на внешней поверхности РС МКС обнаруживаются микроорганизмы разных таксонов в местах, защищенных от космического излучения “космической пылью” [12, 13].

Исследование жизнеспособности и модификации микроорганизмов, присутствующих на/в космическом объекте, на трассе межпланетного полёта важно не только для разработки мер планетарного карантина, но и для обеспечения медико-биологической безопасности экипажа. Исследования на борту орбитального комплекса “Мир” и на борту РС МКС показали, что жизнедеятель-

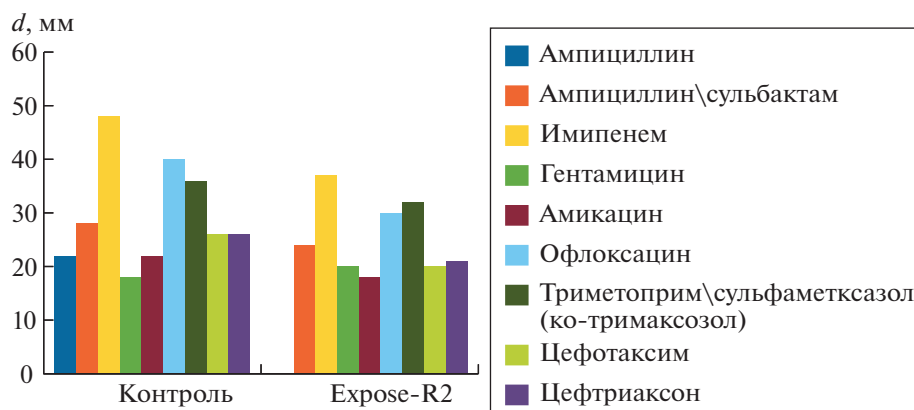


Рис. 1. Диаметры зон задержки роста штамма *Bacillus licheniformis*-24.

ность микроорганизмов в среде космического объекта сопровождается возникновением как медицинских, так и весьма серьёзных технических (технологических) рисков [14, 15].

Многолетние исследования микроорганизмов вне и внутри орбитальных станций показали, что возрастает их агрессивность и устойчивость к воздействию антибиотиков, а споры микроорганизмов сохраняют жизнеспособность после многомесячного пребывания в открытом космосе.

Однако условия при полётах на низких околоземных орбитах (НОО) значительно “мягче”, чем условия при полётах за пределами магнитосферы Земли. Программа Фундаментальных космических исследований ФКП предполагает проведение исследований с биологическими объектами, включая и микроорганизмы, не только на НОО. В частности, для этой цели поднята до 800 км орбита космического аппарата (КА) “Бион-М” № 2. Начаты работы по созданию КА серии “Возврат-МКА” для осуществления космического полёта (КП) за пределами НОО и магнитосферы Земли; будут проводиться микробиологические исследования при пилотируемых полётах за пределами НОО и на Луну; исследования покоящихся форм биологической материи запланированы в проектах “Луна-Грунт” и “Экспедиция-М”.

Однако исследований в реальных КП явно недостаточно, чтобы исследовать в полном объёме имеющиеся риски, поэтому модельные эксперименты и исследования на Земле приобретают важную роль. В частности, для оценки рисков, связанных с возможной “модификацией” микроорганизмов при их нахождении за пределами магнитосферы Земли, необходимо проведение экспериментов по исследованию влияния на них повышенных доз радиации различной природы, гипомангнитной среды и исследование влияния “модифицированных” микроорганизмов на организм животных (мышей), что важно как для обеспечения здоровья экипажей КА за пределами

НОО, так и для обеспечения планетарного карантина Земли.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках базовых тем РАН № 65-4 и 65-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alekseev V., Ravera O. Introduction to Workshop on diapause in Aquatic Invertebrates // J. Limnology. 2004. V. 63. P. 3–5.
2. Alekseev V.R., Starobogatov Y.I. Types of Diapause in Crustacea: Definitions, Distributions, Evolution // Hydrobiologia. 1996. V. 320. P. 15–26.
3. Seki K., Toyoshima M. Preserving Tardigrades Under Pressure // Nature. 1998. V. 395. P. 853–854.
4. Alekseev V.R., Sychev V.N., Novikova N.D. Studying the phenomenon of dormancy: Why It Is Important for Space Exploration // Diapause in aquatic invertebrates: Theory and Human Use. Eds V. Alekseev, B. DeStasio, J. Gilbert. @ISBN 978-14020-5679-6, Dordrecht, the Netherland: Springer. 2007. P. 207–214.
5. Rothschild L.J., Mancinelli R.L. Life in Extreme Environments // Nature. 2001. V. 409. P. 1092–1101.
6. Новикова Н.Д., Поликарпов Н.А., Дешева Е.А., Свиштунова Ю.В., Григорьев А.И. Результаты исследований в эксперименте по длительному экспонированию микроорганизмов в условиях открытого космоса // Авиационная и эколог. медицина. 2007. Т 41. № 2. С. 14–20.
7. Дешева Е.А., Новикова Н.Д., Поликарпов Н.А., Свиштунова Ю.В., Ермак А.Л., Самосадная Т.Е. Основные итоги космического эксперимента “Биориск” и его перспективы // Космонавтика и ракетостроение. 2007. № 4 (49). С 64–70.
8. Баранов В.М., Новикова Н.Д., Поликарпов Н.А., Сычев В.Н., Левинских М.А., Алексеев В.Р., Окуда Т., Сугимото М., Гусев О.А., Григорьев А.И. Эксперимент “Биориск”: 13-месячная экспозиция покоящихся форм организмов на внешней стороне российского сегмента международной космической

- станции (Предварительные результаты) // ДАН. 2009. Т. 426. № 5. С. 706–709.
9. Novikova N., Gusev O., Polikarpov N., Deshevaya E., Levinskikh M., Alekseev V., Okuda T., Sugimoto M., Sychev V., Grigoriev A. Survival of Dormant Organisms after Long-Term Exposure to the Space Environment // *Acta Astronautica*. 2011. V. 68. P. 1574–1580.
 10. Novikova N., Deshevaya E., Levinskikh M., Polikarpov N., Poddubko S., Gusev O., Sychev V. Study of Effects of the Outer Space Environment on Dormant Forms of Microorganisms, Fungi and Plants in the “Expose-R” Experiment // *Int. J. Astrobiology*. 2015. V. 14 № 1. P. 137–142
<https://doi.org/10.1017/S1473550414000731>
 11. Novikova N., Poddubko S., Deshevaya E., Sychev V. Survival of Bacterial and Fungal Spores in the Expose-R2 Experiment // *Int. J. Bioassays*. 2018. V. 7. № 4. P. 5616–5622.
 12. Цыганков О.С., Гребенникова Т.В., Дешева Е.А., Лапшин В.Б., Морозова М.А., Новикова Н.Д., Поликарпов Н.А., Сыроешкин А.В., Шубралова Е.В., Шувалов В.А. Исследование мелкодисперсной среды на внешней поверхности международной космической станции в эксперименте “Тест”: обнаружены жизнеспособные микробиологические объекты // *Космич. техника и технологии*. 2015. № 8 (1). С. 31–41.
 13. Дешева Е.А., Печеркин В.Я., Василяк Л.М., Новикова Н.Д., Гуридов А.А., Цыганков О.С. Выживание микроорганизмов на тестовых объектах при вакуумировании // *Авиакосмич. и эколог. медицина*. 2018. Т. 52. № 2. С. 54–59.
 14. Новикова Н.Д. Концепция обеспечения микробиологической безопасности пилотируемой марсианской экспедиции // *Авиакосмич. и экологическая медицина*. 2003. Т. 37. № 5. С. 56–59.
 15. Novikova N.D. Review of the Knowledge of Microbial Contamination of the Russian Manned Spacecraft // *Microbial Ecology*. 2004. V. 47. P. 127–132.

THE BIOLOGICAL THREAT–THREAT OF A PLANETARY QUARANTINE FAILURE AS A RESULT OF OUTER SPACE EXPLORATION BY HUMANS

V. N. Sychev^{a, #}, N. D. Novikova^a, S. V. Poddubko^a,
E. A. Deshevaya^a, and Academician of the RAS O. I. Orlov^a

^a The Russian Federation State Research Center – Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

[#]e-mail: vnsychev@imbp.ru

The paper presents the results of experiments with spore forming bacteria and microscopic fungi performed within the Russian science program outside the International space station. It was found that in this extreme environment microorganisms not only survive but also retain the reproductive ability. Moreover, most of the microorganisms activated biochemical activity and increased resistance to antimicrobial agents, antibiotics specifically. These findings are of obvious interest to developers of as planetary quarantine methods, so biomedical safety system in manned space exploration missions. In addition, they point up the necessity of experiments with exposure of bio-objects to simulated environmental factors beyond Earth’s magnetosphere.

Keywords: biological threat, outer space exploration, biological organism, microbial culture, remote space mission, orbital station, planetary quarantine