

Гусєв А. М., доц. (каф. ОППЦБ КПІ ім. Ігоря Сікорського)
Морозова В. О., студ. (гр. БМ-81, ФБТ КПІ ім. Ігоря Сікорського)

МІКРОБІОЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЬ, СИСТЕМИ ОЧИЩЕННЯ І СТЕРИЛІЗАЦІЇ НА МКС Є ОСНОВОЮ СКЛАДОВОЮ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ КОСМОНАВТІВ

Анотація: У даній роботі розглядається низка питань щодо співжиття людей і мікробів в екстремальних умовах Міжнародної Космічної Станції (МКС). Зокрема, вплив комплексу космічних факторів (мікрогравітація, іонізуюче випромінювання, довготривале перебування групи людей у замкненому приміщенні) на стан імунної системи астронавтів і селекцію мікробних популяцій. Також, проведено огляд наявних на МКС систем очистки повітря і води, стерилізації поверхонь, обладнання.

Ключові слова: МКС, стерилізація, мікробіологія, очистка повітря, очистка води, замкнені приміщення, мікробіологічний контроль, імунологія.

Abstract: This paper addresses a number of issues related to the coexistence of humans and microbes in the extreme conditions of the International Space Station (ISS). In particular, the influence of a complex of cosmic factors (microgravity, ionizing radiation, long-term stay of a group of people indoors) on the state of the immune system of astronauts and the selection of microbial populations. Also, researching of the air and water purification systems, surface sterilization, and equipment available on the ISS was conducted.

Keywords: ISS, sterilization, microbiology, air purification, water purification, enclosed spaces, microbiological control, immunology.

Вступ: Останнім часом, актуальності набула ідея довготривалих космічних подорожей. В зв'язку з цим проводяться активні дослідження мікробних популяцій в умовах МКС. Потреба контролювати ріст мікробних популяцій, процеси набуття ними нових ознак, напряду пов'язана із підтриманням нормального стану здоров'я астронавтів, в основному – їх імунної системи, адже ще не визначено, чи зможе вона повноцінно адаптуватися до космічного польоту, тобто досягти нового номінального стану. Такі дослідження сприяють ширшому розумінню проблеми і нагальної необхідності створення більш точних систем контролю вологості, методів стерилізації і очистки повітря, поверхонь, обладнання.

Аналіз стану питання: У 2006 році було проведено дослідження динаміки реагування імунної системи астронавтів на космічний політ. Зважаючи на обмежену кількість даних *in vivo*, існують певні складнощі із отриманням статистично значимих результатів. Проте виявлено деякі загальні закономірності, серед них: зниження концентрації Т-лімфоцитів і НК-клітин, послаблення клітинного імунітету, зміна концентрації цитокінів, постійний рівень імуноглобулінів. Доволі очікувано, пізнішими дослідженнями виявлено підвищення сприйнятливості організмів астронавтів до інфекції [1].

До стрес-факторів космічного польоту, що можуть мати вплив на імунну систему астронавтів, відносять наступні: іонізуюче випромінювання, мікрогравітація, інтенсивне тренування перед запуском, і як наслідок – виснаження, зміна барометричного тиску, обмеження у особистій гігієні, незбалансоване харчування, порушення сну і зміни циркадного ритму, пускові перегрузки, недостатнє фізичне навантаження, психологічні проблеми через замкнене середовище, хвороба космічного руху (Space Motion Sickness – SMS), а також – мікробне забруднення, недосконалість систем рециркуляції повітря і води, мінливість мікробних популяцій, як наслідок – набуття мікробами вірулентності, їх міжособистісне конкурування, складнощі із підтриманням їх постійної кількості та ін. Цікаво, що подібні результати щодо зниження працездатності імунної системи в умовах космічного польоту, були отримані також для тварин і культур імунних клітин, *in vivo* та *in vitro* [1,2].

Крім того, у 2007 році проведено масштабне порівняння фенотипових і молекулярно-генетичних характеристик бактерії *Salmonella typhimurium*, вирощеної на борту космічного шатлу Atlantis Mission STS-115, із контрольним ідентичним штамом, вирощеним на Землі. Так, глобальний мікроматричний (технологія ДНК-мікрочіпів) і протеомний аналізи показали зміни експресії 167 транскриптів і 73 білків у бактерії з шатлу. Як наслідок, штам *S. typhimurium* у космічних умовах продемонстрував підвищену здатність до зараження на мишах, а також схильність до утворення стійких бактеріальних конгломератів – біоплівки. Дещо раніше, *S. typhimurium* вирощувалась в наземній моделі з мікрогравітацією (наближено до космічних умов), де, окрім підвищення вірулентності, було відзначено підвищення стійкості штаму до кислотних, теплових і осмотичних стресів, підвищення рівня виживання під час культивування з імунними клітинами – макрофагами. Згодом, було також досліджено підвищення вірулентності у бактерій *Listeria monocytogenes*, *Enterococcus faecalis* [3,4].

Вирішення проблеми швидшої адаптації мікробів до умов космосу: завдяки наземній моделі культивування *S. typhimurium* в умовах мікрогравітації, показано, що зміна експресії викликана глобальним-регулятором – консервативним РНК-зв'язуючим білком Hfq. Фактично, білок Hfq і пов'язані протеїни є перспективними мішенями для препаратів, здатних запобігти підвищенню вірулентності *S. typhimurium*, як на Землі, так і у космосі [3].

Так як погіршення стану імунної системи астронавтів зумовлено комплексом стрес-факторів, звичайно, існує необхідність діяти на кожен з них. У даній роботі особливу увагу приділено системам мікробіологічного контролю поверхонь і приладів, стерилізації, очистки води і повітря. Адже, в зв'язку з тим, що молекулярно-генетичні дослідження мікробних популяцій і досліди з вироблення шляхів інгібування їх адаптивності поки що є занадто дорогими і довготривалими (хоча розробки в даному напрямі неодмінно повинні вестись), наразі створення методів, норм, систем і приладів для контролювання стану мікробних популяцій є більш простим і ефективним варіантом поліпшення здоров'я астронавтів [3].

Мета: Проаналізувати вплив існуючих систем очистки повітря, води, стерилізації обладнання та поверхонь на МКС. Визначити значення постійного мікробіологічного контролю приміщень.

Методики, матеріали і результати досліджень: Отже, розглянемо основні сфери життя на МКС, де мікробіологічний контроль є незамінним, існуючі методи стерилізації і очистки.

1. Мікробіологічний контроль поверхонь на МКС. У 2019 році разом із стандартним мікробіологічним контролем поверхонь методом культивування було проведено молекулярно-генетичне дослідження мікробних популяцій. Досліджувались поверхні у 8-ми приміщеннях МКС протягом 14 місяців. Виявлено, що якісний склад бактеріальних популяцій відносно стабільний, проте кількості окремих видів змінюються з часом. Найбільш поширеними типами бактерій були *Actinobacteria*, *Firmicutes* і *Proteobacteria*. Найбільш поширені родини: *Enterobacteriaceae*, *Methylobacteriaceae*, *Staphylococcaceae* та ін. Поширені роди: *Haemophilus*, *Streptococcus*, *Corynebacterium*, *Staphylococcus*, *Lactococcus*, *Neisseria* та ін. Щодо грибів, то переважали популяції *Rhodotorula mucilaginosa*, що належить до сімейства *Sporidiobolaceae* (41% з 81 дослідженого ізоляту грибів) і *Penicillium chrysogenum* (15% з 81 ізоляту грибів). Більшість мікробів пов'язано із мікробіомом людини, деякі з них вважаються умовно-патогенними. Цікаво, що було знайдено бактерії і гриби, що утворюють стійкі біоплівки: серед бактерій – *Acinetobacter*, *Sphingomonas*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Corynebacterium*, *Klebsiella*; серед грибів біоплівки утворюють наступні роди – *Penicillium*, *Aspergillus*, *Cryptococcus* і *Rhodotorula*. Відомо, що утворення біоплівки сприяє збільшенню стійкості до антибіотиків і навколишніх умов в цілому. Крім того, мікроби у біоплівках здатні викликати корозію (*Sphingomonas*, *Bacillus*, *Penicillium*), особливо алюмінієво-магнієвих сплавів, пошкоджувати полімерні матеріали, як наслідок, знижувати якість інфраструктури МКС. Очевидно, що дослідження складу мікробних популяцій, їх мінливості, здатності до утворення біоплівки важливе у випадку довгострокових польотів [4-

6].

2. Очистка і рециркуляція повітря і води на МКС. Контроль забруднення повітря проводиться AQM (Air Quality Monitor). Очистка повітря на МКС здійснюється завдяки 21 HEPA-фільтрам (HEPA – High Efficiency Particulate Air), що здатні відфільтровувати частинки розмірами до 0,3 мкм (це розміри пилу, вірусів) з ефективністю 99,97%, а також більші частинки (бактерії). HEPA-фільтри розміщені у кожному модулі МКС. Проте система HEPA не відфільтровує силосани, що розчиняються у конденсаті, краплях води, і можуть потрапляти до системи очистки води. Тож, з метою вилучення силосанів з повітря було проведено експеримент – в 1 модулі на 2,5 роки замість HEPA встановлено 4 вугільних фільтри. Рівень силосанів у повітрі згідно AQM дійсно зменшився, проте концентрація мікробів зросла і екіпаж став жалітись на грибкові хвороби. Виходом з положення була розробка комбінованих HEPA-фільтрів із вугільною складовою, що складаються з частин, які можна замінювати незалежно (це дозволяє суттєво знизити масу приладів на МКС) – такі фільтри доставлені на МКС у 2019 році, їх ефективність досліджується. Для видалення з повітря води та вологи використовуються сорбенти (зокрема, на основі силікагелю). Проте, силікагель вже через рік втрачає до 75% здатності поглинати воду (це пов'язано з наявністю низки специфічних забруднень у замкненому приміщенні МКС – випарів пластмас, засобів особистої гігієни та ін.), тому не є ідеальним рішенням. Підвищений рівень вологи крім іншого сприяє утворенню біоплівки і розмноженню мікробів. Тож, для довготривалих космічних подорожей, необхідні більш ефективні матеріали для сорбентів [7-8].

Щодо системи рециркуляції і очистки води, створено ECLSS (складається з двох частин Water Recovery System (WRS) та Oxygen Generation System (OGS)). До системи рециркуляції потрапляє вода з паливних елементів, стічні води після миття рук, сеча, конденсована волога з повітря. Очистка стічних вод здійснюється в три етапи. Тож, вода проходить через: 1. Фільтр, що видаляє вискодисперсні частинки. 2. «Мультифільтраційні шари» – видалення тонкодисперсних органічних і неорганічних домішок. 3. «Реактор каталітичного окиснення» – видаляє леткі органічні сполуки, вбиває бактерії і віруси [9].

3. Стерилізація медичного обладнання. Для відповідності медичного обладнання (скальпелі, щипці, серветки) санітарним нормам, наразі прийнято використовувати одноразове обладнання. Проте, враховуючи перспективу дальніх космічних подорожей і неможливість взяти значну кількість предметів через обмеження бортового навантаження (маси, об'єму), останнім часом ведуться розробки ефективних систем стерилізації невеликого багаторазового медичного обладнання. Так, одним з альтернативних проєктів НАСА, є система стерилізації холодною плазмою [10].

4. Система мікрогравітації МКС (The Microgravity Science Glovebox – MSG) – це система типу «верстак», що використовується для проведення науково-технічних досліджень, зокрема і мікробіологічного характеру. Всередині коробки – негативний тиск. Щодо очистки і циркуляції повітря, система оснащена фільтрами: три блоки фільтрів розміщені послідовно, кожний включає по 8 паралельно включених вискоефективних HEPA-фільтрів. Дезінфекція системи проводиться за допомогою УФ-ламп, також наявні змінні перчатки. Крім того, робота з системою мікрогравітації доволі незручна і регулюється низкою правил і норм безпеки. Ця система з'явилась на МКС улітку 2002 і саме вона відкрила шлях для безпечних мікробіологічних досліджень зокрема [11].

Висновки: Проведено огляд питань співжиття людей і мікроорганізмів на МКС. У підсумку, відзначимо:

1. Рядом досліджень показано погіршення роботи імунної системи астронавтів, як наслідок – послаблення супротиву організму інфекціям, через комплекс космічних чинників.

2. На МКС присутні різноманітні популяції бактерій та грибків, як непатогенних, так і умовно патогенних. Вони розвиваються, адаптуються до екстремальних умов, можуть набути нових властивостей.

3. Повномасштабні молекулярно-генетичні дослідження мікробів МКС хоч і мають поступово проводитись, поки не є економічно доцільними. Але такі дослідження є цікавими з наукової точки зору, також вони прискорюють винайдення нових антимікробних препаратів.

4. Найбільш оптимальним шляхом контролювання рівня мікробної контамінації є використання систем очистки повітря і води (як від мікробів, так і інших забруднень), проведення регулярної стерилізації обладнання і поверхонь. У напрямку винайдення більш ефективних систем очистки, сорбентів ведуться активні перспективні дослідження.

Література:

1. Aponte, V. M., Finch, D. S., Klaus, D. M. Considerations for non-invasive in-flight monitoring of astronaut immune status with potential use of MEMS and NEMS devices /Aponte, V. M./ Life Sciences, 79(14) – 2006 – p. 1317–1333.

2. Sonnenfeld, G., Shearer, W. T. Immune function during space flight /Sonnenfeld, G./ Nutrition, 18(10) – 2002 – p. 899–903.

3. J. W. Wilson, C. M. Ott, K. Höner zu BentrupSpace flight alters bacterial gene expression and virulence and reveals a role for global regulator Hfq /J. W. Wilson, C. M. Ott/ PNAS 104 (41) – 2007 – p. 16299-16304

4. Maximilian Mora, Lisa Wink, Ines Kögler Space Station conditions are selective but do not alter microbial characteristics relevant to human health /Maximilian Mora, Lisa Wink/ Nature Communications vol.10 (3990) – 2019

5. Aleksandra Checinska Sielaff, Camilla Urbaniak, Ganesh Babu Malli Mohan Characterization of the total and viable bacterial and fungal communities associated with the International Space Station surfaces /Camilla Urbaniak/ Microbiome vol.7 (50) – 2019

6. T. A. Alekhova, A. A. Aleksandrova, T. Yu. Novozhilova Monitoring of Microbial Degradation in Manned Space Stations /T. A. Alekhova/ Applied Biochemistry and Microbiology vol.41 – 2005 – p. 382–389

7. Kevin M. Braman, Susan M. Snyder Design and Implementation of Combination Charcoal and HEPA Filters for the International Space Station Cabin Air Ventilation System /Kevin M. Braman/ 49th International Conference on Environmental Systems, Boston, Massachusetts ICES – 2019 – 374

8. [Електронний ресурс] Доступ за посиланням: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/long_duration_sorbent_testbed

9. [Електронний ресурс] Доступ за посиланням:

https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/benefits/water_filtration/

10. Z. Duda, J. Gaffney, C. Graves, Q. Moore, J. Watkins, J. Nagel, Medical sterilization system for NASA Space Exploration Missions /Z. Duda/ Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS) – 2017 – p. 277-282

11. [Електронний ресурс] Доступ за посиланням:

https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/decontamination.html