

## ПРОБЛЕМНАЯ СТАТЬЯ

## МИКРОНУТРИЕНТЫ В ПИТАНИИ КОСМОНАВТОВ

Д.В. Рисник<sup>1</sup>, В.М. Коденцова<sup>2\*</sup><sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»  
Российская Федерация, 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12<sup>2</sup> ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи»  
Российская Федерация, Москва, Устьинский проезд, д. 2/14

**РЕЗЮМЕ.** Космическое питание (продукты и блюда, созданные специально для космонавтов) для обеспечения оптимального физиологического и психологического состояния должно удовлетворять ежедневную потребность организма космонавта не только в макронутриентах (белки, жиры, углеводы), но и в микронутриентах.

**Цель обзора** – оценка потребления и обеспеченности организма космонавтов микронутриентами во время длительных полетов и обоснование необходимости повышения микронутриентной ценности космического питания.

**Результаты.** Расчетные величины потребления железа, цинка, кальция и калия у космонавтов во время полета приближаются к уровню их рекомендуемого суточного потребления, у отдельных членов экипажа потребление минеральных веществ может не достигать рекомендованных норм. Фактический рацион космонавтов, сбалансированный по основным пищевым веществам, не всегда удовлетворяет потребности организма космонавта в микронутриентах. Оценка обеспеченности витаминами и минеральными веществами по уровню в крови или моче показывает, что к концу длительного полета микронутриентный статус ухудшается. В крови уменьшается концентрация витаминов D, K, фолатов, калия, магния, повышается уровень биомаркеров деградации коллагена, снижается минеральная плотность костной ткани. В совокупности исследования свидетельствуют о неадекватности витаминного состава рациона космонавтов в предполетный период, и космического питания во время полета. Изменения микронутриентного статуса космонавтов, произошедшие во время полета, сохраняются в течение длительного времени или даже усугубляются после возвращения на Землю.

**Заключение.** В период предполетной подготовки обеспеченность микронутриентами членов экипажа должна быть доведена до оптимального уровня путем приема витаминно-минеральных комплексов (ВМК) с содержанием всех витаминов в дозе, соответствующей физиологической потребности, в течение длительного времени (несколько месяцев). Микронутриентная плотность ряда традиционных блюд и продуктов космического питания должна быть повышена путем их обогащения витаминами. Для восполнения недостаточного потребления микронутриентов с рационом во время длительного полета необходим ежедневный прием многокомпонентных ВМК, содержащих дефицитные микронутриенты. Необходима разработка технологий (например, инкапсуляция), обеспечивающих сохранность витаминов при обогащении ими блюд и пищевых продуктов космического питания.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** витамины, макро- и микроэлементы, космонавты, микронутриентная недостаточность, витаминно-минеральные комплексы.

**Для цитирования:** Рисник Д.В., Коденцова В.М. Микронутриенты в питании космонавтов. Микроэлементы в медицине. 2025;26(1):3–16. DOI: 10.19112/2413-6174-2025-26-1-3-16.

## ВВЕДЕНИЕ

Рацион питания космонавтов должен удовлетворять ряду обязательных требований. Содержание основных пищевых веществ должно быть сбалансированным, причем одновременно с высокой энергетической ценностью, а вес и объём космической еды должны быть минимальными. Космическое питание (продукты и блюда, созданные специально для космонавтов) должно быть не только разнообразным и приемлемым по

вкусовым качествам, соответствовать разным вкусам, но и удовлетворять суточную потребность организма человека в макронутриентах (белки, жиры, углеводы) и микронутриентах, что необходимо для обеспечения оптимального физиологического и психологического состояния в космосе.

Основными категориями космической еды являются консервы, сублимированные продукты, продукты с уменьшенной влажностью, нату-

---

\* Адрес для переписки:

Коденцова Вера Митрофановна

E-mail: kodentsova@ion.ru

ральные продукты, охлаждённые продукты, свежие продукты, облученные продукты и функциональные продукты (Tang et al., 2021). Во время космического полёта космонавты должны потреблять достаточное количество пищи, чтобы не только удовлетворять свои потребности в пищевых веществах, но и минимизировать неблагоприятное воздействие космического полёта на организм (радиация, ослабление иммунитета, окислительный стресс, потеря костной и мышечной массы) (Bergouignan et al., 2016). Увеличение продолжительности полётов и любые отклонения от оптимального питания могут негативно сказываться на большинстве физиологических систем организма.

**Ц е л ь о б з о р а** – оценка потребления и обеспеченности организма космонавтов во время

длительных полетов микронутриентами и обоснование необходимости повышения микронутриентной ценности космического питания.

Обзор доступной в открытой печати литературы по проблеме микронутриентного статуса космонавтов за последние годы осуществляли по базам данных РИНЦ, PubMed, а также в системах Google Scholar, ReserchGate по ключевым словам: «vitamin», «mineral», «astronaut», а также их русским аналогам.

### **ФАКТИЧЕСКОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОТРЕБНОСТИ КОСМОНАВТОВ В МИКРОНУТРИЕНТАХ**

В табл. 1 и 2 представлены сведения о потреблении макро- и микроэлементов космонавтами.

**Таблица 1. Суточное потребление (мг) микронутриентов космонавтами  
(Burchkov et al., 2021)**

| Микронутриент | РНП*             | «Аполлон»<br>(Apollo) | Скайлэб<br>(Skylab) | «Спейс<br>шаттл»<br>(Space Shuttle) | МКС<br>(E1-13) | МКС<br>(E14-25) | МКС<br>(E26-37) |
|---------------|------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Кальций       | 1000             | 774 ± 212             | 894 ± 142           | 826 ± 207                           | 878 ± 274      | 944 ± 258       | 1074 ± 205      |
| Фосфор        | 700              | 1122 ± 325            | 1760 ± 267          | 1216 ± 289                          | –              | –               | –               |
| Магний        | 420              | –                     | 310 ± 58            | 294 ± 74                            | –              | –               | –               |
| Железо        | 10 (м)<br>18 (ж) | –                     | –                   | 15,0 ± 3,9                          | 18 ± 5         | 18 ± 5          | 20 ± 5          |
| Цинк          | 12               | –                     | –                   | 12,0 ± 2,9                          | –              | –               | –               |
| Натрий        | 1300             | 3666 ± 890            | 5185 ± 948          | 3984 ± 853                          | 4601 ±<br>1239 | 4658 ± 1593     | 3823 ± 785      |
| Калий         | 3500             | 2039 ± 673            | 3854 ± 567          | 2391 ± 565                          | 3315 ± 513     | 3214 ± 863      | 3559 ± 784      |

**П р и м е ч а н и е :** РНП – рекомендуемая норма потребления; \* – нормы физиологических потребностей в витаминах и минеральных веществах для мужчин (м) и женщин (ж) (МР 2.3.1.0253-21. 2.3.1.), МКС – Международная космическая станция.

**Таблица 2. Суточное потребление (мг) минеральных элементов членами экипажей МКС  
с 2006 по 2009 г. (Smith et al., 2012)**

| Микронутриент | РНП*            | iRED (n=8) | ARED (n=8)  |
|---------------|-----------------|------------|-------------|
| Кальций       | 1000            | 912 ± 229  | 894 ± 142   |
| Железо        | 10 (м) – 18 (ж) | 24 ± 8-    | 19 ± 6      |
| Натрий        | 1300            | 4159 ± 656 | 5327 ± 2617 |
| Калий         | 3500            | 2980 ± 435 | 3465 ± 1435 |

**П р и м е ч а н и е :** \* – нормы физиологических потребностей в витаминах и минеральных веществах для мужчин (м) и женщин (ж) (МР 2.3.1.0253-21. 2.3.1.), МКС – Международная космическая станция.; iRED – временное резистивное устройство для упражнений; ARED – усовершенствованное резистивное устройство для упражнений.

С участием 17 космонавтов было проведено тестирование двух четырехдневных диет, составленных из доступных космических продуктов с высоким (1,0–1,3 г белка/мЭкв калия) и низким (0,3–0,6 г/мЭкв) соотношением животного белка. Результаты показали, что суточное потребление калия находилось в диапазоне от  $2895 \pm 300$  до  $5094 \pm 185$ , кальция – от  $1357 \pm 191$  до  $1516 \pm 259$  мг, натрия – от  $3726 \pm 114$  до  $4641 \pm 1239$  мг (Zwart et al., 2018).

Рационы питания экипажей Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (National Aeronautics and Space Administration, сокр. NASA (НАСА)) и Роскосмоса на практике очень похожи из-за обмена продуктами (Seidler et al., 2022). Анализ и сравнение данных табл. 1 и 2 показывает, что, хотя на Международной космической станции (МКС) в среднем потребление железа, цинка, кальция и калия приближается к рекомендуемому суточному уровню, у отдельных членов экипажа поступление минеральных веществ может не достигать рекомендуемых норм.

### **ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ КОСМОНАВТОВ МИКРОНУТРИЕНТАМИ**

В открытой литературе данные, касающиеся оценки обеспеченности космонавтов микронутриентами, единичны (Smith et al., 2005). Результаты одного такого уникального обследования представлены в табл. 3.

Исходное предполетное обследование, опубликованное в 2005 г. (Smith et al., 2005), показало, что у большинства космонавтов до полёта уровень в плазме крови транспортной формы витамина D – 25-гидроксивитамина D ( $25(\text{OH})\text{D}_3$ ) не достигал нормальных значений. Несмотря на то, что некоторые космонавты принимали добавки витамина D ( $5,7 \pm 4,0$  раза в неделю), концентрация  $25(\text{OH})\text{D}_3$  в сыворотке крови членов экипажа МКС после посадки уменьшилась примерно на 25% по сравнению с величиной до полета. Во время космического полета статус витамина К также ухудшился, уровень филлохинона (витамин  $\text{K}_1$ ) в сыворотке крови снизился на 42%. Обеспеченность витамином А (концентрация ретинола, ретинолсвязывающего белка, транстиретина), а также витамином Е ( $\alpha$ -токоферол) не изменилась. До полета уровень фолатов в эритроцитах большинства космонавтов находился на верхней границе нормы или был близок к ней, а после полета приблизился к нижней границе нормы. В сыворотке крови снизился уровень антиоксидантных микронутриентов (селена,  $\gamma$ -токоферола, который

не является витамином, но обладает антиоксидантными свойствами). Концентрации магния и фосфора в моче после приземления оказались примерно на 45% ниже, чем в предполетный период. В совокупности эти данные, свидетельствующие об ухудшении микронутриентного статуса организма, отражают неадекватность витаминного состава рациона космонавтов в предполетный период и космического питания во время полета.

Сделано заключение, что ключевым фактором, способствующим ухудшению витаминного статуса космонавтов, является недостаточное потребление пищи, а причиной ухудшения антиоксидантного статуса – радиационный/окислительный стресс. Ограниченное содержание фолатов в питании во время полёта приводит к снижению их уровня в эритроцитах.

В более позднем обследовании были определены маркеры метаболизма костей и кальция в крови до, во время и после длительного космического полета у 13 космонавтов.

Исследования крови и суточной мочи, проведенные до запуска, в день посадки и пятикратно на 15, 30, 60, 120 и 180-й дни полета на фоне силовых упражнений или без них показали, что концентрация в сыворотке крови остеокальцина и кальция не претерпевала изменений, концентрация  $25(\text{OH})\text{D}_3$  на 30-е сутки полета снизилась на 25–45% по сравнению с предполетной, но на момент приземления уже составляла 110–135% от исходной величины (Smith et al., 2012). Аналогичная динамика отмечена для 1,25-гидроксивитамина D ( $1,25(\text{OH})_2\text{D}_3$ ). К 15-му дню пребывания на МКС суточная экскреция кальция повысилась примерно на 15% и оставалась на этом уровне до 60-го дня, а затем к 120-му дню пребывания на МКС снизилась до исходного уровня. Во все моменты сбора мочи биомаркеры деградации коллагена (N-телопептид, C-телопептид, пиридиниевые сшивки и др.) были повышены по сравнению с исходным уровнем примерно в 2 раза (Zheng et al., 2023). Измерение минеральной плотности костей в разных отделах скелета показало, что во время 4–6-месячных миссий на МКС в условиях микрогравитации адекватное потребление энергии и витамина D в сочетании с силовыми упражнениями могут поддерживать минеральную плотность костной ткани в большинстве областей без использования фармацевтических средств (Smith et al., 2012).

Изменения микронутриентного статуса, у космонавтов, произошедшие во время полета, сохраняются в течение длительного времени или даже усугубляются после возвращения на Землю (табл. 4).

**Таблица 3. Концентрация ( $M \pm \sigma$ ) некоторых витаминов, макро- и микроэлементов в крови и суточной моче у космонавтов ( $n = 11$ ) до и после длительного (4–6 месяцев) космического полета (Smith et al., 2005)**

| Показатель                                     | Предполетная подготовка | После полета        | Норма                           |
|------------------------------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------------------|
| <i>Сыворотка крови</i>                         |                         |                     |                                 |
| 25(OH)D <sub>3</sub> , нмоль/л                 | <b>63,4 ± 15,8</b>      | <b>47,7 ± 20,4*</b> | 75–250                          |
| 1,25(OH) <sub>2</sub> D <sub>3</sub> , нмоль/л | 124,5 ± 37,3            | 121,1 ± 38,9        | 18–64 пг/мл-                    |
| Витамин К <sub>1</sub> (филлохинон), нмоль/л   | <b>1,2 ± 0,6</b>        | <b>0,7 ± 0, 5*</b>  | ≈ 1,0                           |
| Ретинол, мкмоль/л                              | 2,09 ± 0,57             | 2,07 ± 0,47         | 1,0–2,8                         |
| Ретинилпальмитат, нмоль/л                      | <b>30,1 ± 12,8</b>      | <b>61,5 ± 33,6*</b> | –                               |
| β-Каротин, мкмоль/л                            | 0.40 ± 0.42             | 0.45 ± 0.28         | 0,37–0,70                       |
| α-Токоферол, мкмоль/л                          | 30,1 ± 8,4              | 32,5 ± 6,7          | 19–35                           |
| γ-Токоферол, мкмоль/л                          | <b>3,2 ± 1,9</b>        | <b>1,6 ± 1,1*</b>   |                                 |
| Ретинолсвязывающий белок, мг/л                 | 53,0 ± 10,4             | 50,7 ± 9,3          | 20–75 мг/л                      |
| Транстиретин, мг/л                             | 290 ± 47                | 300 ± 36            | –                               |
| Кальций, ммоль/л                               | 2,34 ± 0,03             | 2,30 ± 0,10         | 2,15–2,5                        |
| Ионизированный кальций, ммоль/л                | 1,21 ± 0,02             | 1,17 ± 0,05         | 1,15–1,32                       |
| Селен, мкмоль/л                                | <b>2,29 ± 0,27</b>      | <b>2,03 ± 0,22*</b> | > 1,37 (> 108 мкг/л)            |
| Супероксиддисмутаза, Ед/г гемоглобина          | 1315 ± 101              | 1195 ± 132*         | 1200–2000                       |
| Фолаты в эритроцитах, нмоль/л                  | <b>1549 ± 403</b>       | <b>1260 ± 423*</b>  | <b>1200</b><br>(523–1257 нг/мл) |
| <i>Моча суточная</i>                           |                         |                     |                                 |
| Йод, мкмоль                                    | 3,08 ± 2,04             | 3,29 ± 2,10         | 100–200 мкг/л                   |
| Магний, ммоль                                  | <b>4,8 ± 1,8</b>        | <b>2,7 ± 0,8*</b>   | > 3,0                           |
| Фосфор, ммоль                                  | <b>31,5 ± 8,4</b>       | <b>16,9 ± 5,6*</b>  | 12,9–42,0                       |

П р и м е ч а н и е : \* – статистически значимое отличие, жирным шрифтом выделены показатели, претерпевшие статистически значимые изменения.

**Таблица 4. Изменение уровня 25-OHD и минеральных веществ в сыворотке крови и моче космонавтов ( $n = 27$ ) во время и после полета (Zheng et al., 2023)**

| Микронутриент          | Во время полета | После полета |
|------------------------|-----------------|--------------|
| <i>Сыворотка крови</i> |                 |              |
| Цинк                   | ↑               | ↓            |
| Железо                 | ↓↑              | ↓            |
| 25-OHD                 | ↓               | ↓↓           |
| <i>Моча суточная</i>   |                 |              |
| Натрий                 | ↓↑              | ↓            |
| Калий                  | ↓               | ↓↓           |

П р и м е ч а н и е : ↑ – увеличение уровня у всех; ↓↑ – у части космонавтов увеличение, у части снижение; ↓ – снижение уровня у всех; ↓↓ – сильное снижение уровня у всех.

## **ПРИЧИНЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ НЕДОСТАТКА МИКРОНУТРИЕНТОВ У КОСМОНАВТОВ**

Основной медицинской проблемой космических полётов является потеря массы тела космонавтами во время космических миссий, что обусловлено снижением потребления калорий примерно на 25–30% во время космического полёта (Bergouignan et al., 2016). Расчеты показывают, что даже идеально построенный рацион взрослых, рассчитанный на 2500 ккал в день, дефицитен по большинству витаминов, по крайней мере, на 20%.

Во время и после длительного (6 мес.) космического полета более чем у 50% космонавтов развивается комплекс изменений, нейроокулярный синдром – офтальмологические изменения, включая рефракционные изменения, отек диска зрительного нерва, уплощение глазного яблока, и др. (Macias et al., 2020; Cialdai et al., 2021). Помимо микрогравитации его развитию способствуют радиационное воздействие, генетическая предрасположенность, условия окружающей среды внутри космического корабля и продолжительность космических полетов (Mehare et al., 2024). Одним из предикторов выступает недостаточная обеспеченность витаминами группы В (Smith, Zwart, 2018).

## **СОХРАННОСТЬ ВИТАМИНОВ В ПРОДУКТАХ КОСМИЧЕСКОГО ПИТАНИЯ**

Обработка и хранение влияют на сохранность большинства витаминов, но степень их разрушения зависит от состава продукта, способа обработки, упаковки, срока и условий хранения. Сохранность витаминов определена в 109 из 203 продуктов, доступных в настоящее время в стандартном меню МКС, которые были обработаны и упакованы в соответствии с текущими требованиями к космическим полётам, а затем хранились при температуре 21°C в течение 3 лет (Coore et al., 2017). Определение микронутриентов в космическом рационе показало, что содержание витаминов D и K, а также кальция и калия в свежеработанных продуктах не обеспечивает уровня рекомендуемого потребления. Содержание витаминов В<sub>1</sub> и С при хранении в космосе в течение 3 лет при температуре 21°C быстро снижалось, тогда как витамины А, В<sub>6</sub> и В<sub>12</sub> разрушались незначительно или продолжали оставаться в продуктах в количестве, достаточном для обеспечения потребности организма. Содерже-

ние витамина С после 3 лет хранения в большинстве фруктовых продуктов снизилось на 32–83%. Витамин С оказался более стабильным в сублимированных продуктах, которые защищены от окисления (продукты с соусами), а также в порошкообразных обогащенных напитках. В блюдах из курицы и говядины разрушение витамина В<sub>6</sub> составило 26 и 22% соответственно. Витамин В<sub>1</sub> был более стабилен в хлебобулочных изделиях, чем в мясных продуктах. Значительному разрушению подвергаются витамины В<sub>2</sub>, А и С (Dakkumadugula et al., 2023).

На основании сравнения сохранности витаминов при хранении пищевых продуктов в космосе и на Земле был сделан вывод, что основным фактором, приводящим к разрушению, является продолжительность хранения, а не космический полёт как таковой (Chaloulakou et al., 2022).

В качестве технологии, повышающей сохранность витаминов, предложено использовать инкапсулированные витамины. Так, в картофельном пюре (помещенном после термообработки в вакуумные упаковки из пленок различного вида), обогащенном инкапсулированной и не инкапсулированной аскорбиновой кислотой, при хранении при температуре 5 °C в течение 90 дней сохранность инкапсулированного витамина С была выше. Потери составили 13–31% против 12–76% при использовании обычного витамина С (Sonar et al., 2020). Совместное обогащение пюре витаминами А (пальмитат) и Е (ацетат) показало, что в инкапсулированном виде сохранность полная, а потери при использовании обычных витаминов составили 4–5%.

## **НУТРИТИВНАЯ ПОДДЕРЖКА КОСМОНАВТОВ**

Хорошо зарекомендовавшим себя наземным аналогом изучения космических полетов является постельный режим с наклоном головы вниз, при котором здоровые участники прикованы к постели в положении с наклоном головы вниз на 6° (Gao, Chilibeck, 2020). Постельный режим с наклоном головы вниз используется для изучения физиологических адаптаций во время космического полета и изучения мер противодействия этим изменениям, поэтому такие исследования имеют непосредственное применение, а также актуальны для клинических условий на Земле. Постельный режим вызывает мультисистемные эффекты, аналогичные тем, которые часто наблюдаются во время космических полетов.

К ним относятся атрофия мышц, непереносимость глюкозы, повышенная резорбция костной ткани и снижение гидростатического градиента давления в сердечно-сосудистой системе (Gao, Chilibeck, 2020). Снижение нагрузки на скелет увеличивает резорбцию костной ткани и снижает образование костной ткани (Gao, Chilibeck, 2020; Zheng et al., 2023).

В зрелом возрасте скелет находится в равновесном состоянии по отношению к кальцию, поэтому для предотвращения потери костной массы жизненно важно потреблять достаточное количество этого элемента. Витамин D поддерживает гомеостаз кальция, увеличивая всасывание кальция из кишечника. В этом смысле диетические проблемы пациентов ортопедического профиля на Земле и у космонавтов в космосе имеют общие черты (Briguglio, 2021).

Считается, что одной из ключевых проблем для космических полётов и ограничений в системе питания является поддержание адекватного статуса витамина D. По данным С.М. Смита с соавт. (Smith et al., 2005) членам экипажа выдавались добавки витамина D (10 мкг или 400 МЕ в сут). Некоторые члены экипажа принимали поливитаминные комплексы по собственному усмотрению и/или по рекомендации врача.

Позже было доказано, что ежедневный прием витамина D в дозе 800 МЕ достаточен для поддержания уровня витамина D в условиях полного отсутствия ультрафиолетового облучения и небольшим количеством пищевых продуктов – источников витамина D (Smith et al., 2012). Показано, что во время 4–6-месячных миссий в условиях микрогравитации на МКС адекватное потребление энергии и витамина D в сочетании с силовыми упражнениями могут поддерживать минеральную плотность костной ткани в большинстве областей скелета (Smith et al., 20).

Измерение у 2 космонавтов-мужчин 39 и 40 лет перед полетом, во время и после полета длительностью 21 день, в ходе которого ежедневное потребление кальция составляло 800–1200 мг, а витамин К в рацион не добавлялся, и 180-дневного космического полета биохимические маркеры, отражающие ремоделирование костей (концентрация пропептида проколлагена I типа и активность костного изофермента щелочной фосфатазы), снизились уже через 8 дней после запуска. Процент недокарбоксилированного остеокальцина в сыворотке крови, свидетельствующего о недостатке витамина К в пище,

увеличился с 14,5% в предполетный период до 22,5% и оставался высоким во время обоих полетов (Caillot-Augusseau et al., 2000).

Остеокальцин представляет собой витамин D (транскрипция регулируется 1,25-дигидроксивитамином D<sub>3</sub> [1,25(OH)D<sub>3</sub>]) и одновременно витамин К-зависимый белок, синтезируемый исключительно в кости в процессе ее формирования. Остеокальцин обнаруживается в сыворотке крови и используется в качестве биомаркера формирования кости. При дефиците витамина К в рационе питания уровень некарбоксилированной фракции ОС (ucOC) увеличивается, тогда как при увеличении потребления витамина К снижается. Уровень циркулирующего нефосфорилированного некарбоксилированного матриксного Gla белка оказался предиктором сердечно-сосудистого риска и смертности, в то время как уровень циркулирующего полностью некарбоксилированного матриксного Gla белка связан с распространенностью артериальной кальцификации (Shea et al., 2021; Wang, Ma, 2023).

Саплементация по 10 мг витамина К с 86 по 130 день во время длительного полета восстановила γ-карбоксилирование остеокальцина у космонавтов (Caillot-Augusseau et al., 2000), однако после отмены приема витамина К степень недокарбоксилированного остеокальцина вернулась к исходному уровню.

В экспериментах на крысах показано, что после воздействия γ-излучения однократная доза витамина С (400 мг на 1 кг массы тела) повышает выживаемость (Mortazavi et al., 2014). В качестве радиопротектора предлагается использование витамина С, однако дозы не обсуждаются (Sihver, Mortazavi, 2021). Во время длительных космических полётов природные антиоксиданты могут оказаться полезными, однако подчеркивается, что их следует принимать регулярно, а не одноразово или от случая к случаю, и не превышая верхний безопасный уровень потребления, поскольку антиоксиданты в высоких дозах и в присутствии ионов металлов могут оказывать прооксидантное действие (Gómez et al., 2021).

В рандомизированном, контролируемом, слепом исследовании прием добавки антиоксидантов, содержащей 741 мг полифенолов, 2,1 г омега-3 полиненасыщенных жирных кислот, 168 мг витамина Е и 80 мкг селена, не смягчил ухудшающее воздействие на минеральную плотность костной ткани добровольцев, находившихся в течение 60 сут на постельном режиме с наклоном головы вниз на 6° (Austermann et al., 2023).

Помимо витамина D, для восполнения недостатка витаминов космонавтам рекомендуют «Гексавит» – разработанный еще в СССР витаминный комплекс (в настоящее время выпускаемый разными фирмами), содержащий 6 витаминов (аскорбиновая кислота, никотинамид, рибофлавин, пиридоксина гидрохлорид, тиамина гидрохлорид, ретинола ацетат) в дозах около 100% от РНП.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Основной медицинской проблемой космических полётов является потеря массы тела космонавтами во время космических миссий, что обусловлено снижением потребления калорий примерно на 25–30% во время полёта. Показано, что рацион с энергетической ценностью менее 2000 ккал/сут ведет к обязательному параллельному снижению потребления микронутриентов и снижению уровня витаминов B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>6</sub> и β-каротина в крови при сохранении концентрации витаминов C, A и E на адекватном или оптимальном уровне. Исходя из того, что содержание основных пищевых веществ в рационе должно быть сбалансированным, а вес и объём космической еды должны быть минимальными, очевидно, что микронутриентная плотность должна быть повышена за счет технологического обогащения (фортификации) микронутриентами.

Еще одной из возможных причин развития недостаточности витаминов во время космических миссий является длительное хранение пищевых продуктов, в процессе которого уменьшается их витаминная ценность. Способствовать возникновению недостаточности может и нарушение всасывания витаминов в желудочно-кишечном тракте (нарушение секреции желчи, необходимой для всасывания жирорастворимых витаминов, нарушение усвоения пищевых веществ в результате стрессов). Развитие стресса вне зависимости от его природы (иммобилизация, воздействие вредных факторов окружающей среды, радиационное воздействие, алиментарный и др.) приводит к ухудшению витаминного статуса организма (витамины E, A, C) (Коденцова и др., 2013). Увеличенное зависимое от витамина C образование катехоламинов при стрессовых ситуациях сопровождается повышением потребности в этом витамине. Обеспеченность отдельными витаминами (B<sub>1</sub>, E, C, B<sub>6</sub>) оказывает влияние на антиоксидантный статус организма.

Изменения биохимических и иммунных показателей космонавтов связаны с неблагоприятными эффектами адаптации к микрогравитации, такими как резорбция костной ткани и нарушение функции почек, а также с дисрегуляцией иммунной системы. Изменения физиологических функций организма в длительных космических полётах (воспалительные реакции, метаболический стресс, усиление резорбции костной ткани, потеря мышечной массы, развитие инсулинорезистентности и др.) имеют сходство с процессами старения (Тосси et al., 2024). Причины потери костных минералов, обусловленные космическим полетом, до конца не изучены и носят многофакторный характер. Установлена ассоциация между недостаточной обеспеченностью организма витамином D и возникновением трех взаимовлияющих друг на друга процессов: окислительного стресса, воспаления и эндотелиальной дисфункции.

Необходимым условием осуществления витамином D своих функций является полноценное обеспечение организма человека всеми витаминами, необходимыми для образования гормонально активной формы витамина D и осуществления контролируемых ею многочисленных физиологических процессов, включая обмен кальция и остеогенез (Спиричев, Громова, 2012). Аскорбиновая кислота необходима для нормального осуществления процессов стероидогенеза, в том числе синтеза важнейшего предшественника витамина D – холестерина. Коферментные формы витамина B<sub>2</sub> входят в состав активного центра флавопротеиновых монооксигеназ, осуществляющих гидроксилирование витамина D при его превращении в гормонально активную форму 1,25(OH)<sub>2</sub>D. Коферментная форма витамина B<sub>6</sub> – пиридоксальфосфат играет важную роль в модификации структуры белковых рецепторов стероидных гормонов, в том числе рецепторов (VDR) гормонально активной формы витамина D. Никотинамидные коферменты (производные витамина PP) необходимы в качестве источника восстановительных эквивалентов в процессах гидроксилирования витамина D с образованием 1,25(OH)<sub>2</sub>D. Фолаты важны для поддержания пролиферативной способности клеток, в том числе клеток костной ткани в процессах ее обновления. Витамин E как антиоксидант выступает в качестве протектора микросомальных и митохондриальных гидроксилаз, в

том числе участвующих в синтезе гормонально активной формы витамина D. Витамин К участвует в посттрансляционной модификации кальцийсвязывающих белков, в том числе кальцийсвязывающего белка остеокальцина, синтез которого на генетическом уровне индуцирует гормонально активная форма витамина D.

В процессах остеогенеза задействованы и другие микронутриенты. Значение витаминов С и В<sub>6</sub> в остеогенезе определяется их ролью в синтезе и созревании коллагена – белка костной ткани, образующего соединительнотканые волокна, которые придают костям упругость при деформации, и формирующего центры нуклеации (зародышеобразования), облегчающие пространственно ориентированное, упорядоченное отложение кристаллов основного минерального вещества костей – гидроксиапатита. Аскорбиновая кислота непосредственно участвует в процессе созревания коллагена, катализируя гидроксилирование в молекуле коллагена остатков пролина в гидроксипролин. Дефицит витамина С, нарушая образование указанных форм витамина D, ведет к развитию вторичного, функционального D-гиповитаминоза, который выражается в гипокальциемии, снижении всасывания кальция в кишечнике, а также минеральной плотности скелета.

Таким образом, необходимым условием реализации витамином D его функции по поддержанию гомеостаза кальция и remodelированию скелета является оптимальное обеспечение организма витаминами С и В<sub>2</sub>, принимающими непосредственное участие в образовании активных форм витамина D. Недостаток этих витаминов даже при нормальном снабжении организма кальцием и витамином D тормозит реализацию их функции по поддержанию нормальной структуры и минеральной насыщенности скелета. Улучшение обеспеченности одним витамином может способствовать эффективному превращению другого витамина в его активную форму. Ликвидировать недостаток витамина D невозможно без устранения недостаточности других витаминов (С, Е, К, группы В), участвующих в превращении витамина D в свою активную форму или процессах остеогенеза. То есть при недостаточной обеспеченности организма другими витаминами прием витамина D не всегда может скорректировать нарушения, причиной которых является недостаток активных форм витамина D (Коденцова, Рисник, 2020).

В связи с этим становится ясно, что для того, чтобы эффективно использовать витамин D для снижения риска нарушений, причиной которых является недостаток этого витамина, необходимо применять его в сочетании с полным набором всех необходимых для реализации его физиологических функций витаминов в дозах, соответствующих физиологической потребности организма.

В настоящее время разработано несколько надежных способов коррекции микронутриентной недостаточности, эффективность которых научно доказана.

Прежде всего, это технологическое обогащение пищевых (специализированных) продуктов, что подразумевает добавление витаминов и/или минеральных веществ к продукту в процессе его изготовления. В суточной порции обычного обогащенного продукта содержание добавленного микронутриента может составлять 15–50% от рекомендуемой нормы потребления (РНП), в специализированных пищевых продуктах содержание витаминов может достигать 300% от РНП.

Не менее надежным способом является прием сбалансированных витаминно-минеральных комплексов (ВМК), содержание отдельных микронутриентов в которых варьируется от 15 до 300% от РНП. Кроме того, в какой-то мере в условиях космоса может быть использована биофортификация – повышение микронутриентной ценности пищевой продукции путем агрономических приемов с применением удобрений или опрыскивания растений микроэлементами. В частности, выращивание зелени капусты *Brassica rapa* L., кориандра (*Coriandrum sativum* L.), зеленого и фиолетового базилика (*Ocimum basilicum* L.) на среде с повышенным содержанием йодида калия привело к повышению содержания йода и суммарного количества полифенольных соединений (Ritieni et al., 2023).

В настоящее время уже установлены основные принципы применения и требования к композиционному составу ВМК, обеспечивающие максимальную эффективность для поддержания оптимальной обеспеченности организма микронутриентами (Коденцова и др., 2024).

Для улучшения витаминного статуса требуется время, более длительное при приеме ВМК с низкими дозами, причем для каждого из витаминов время достижения оптимальных концентраций разное (Коденцова, Вржесинская, 2006). Для

оптимизации витаминного статуса организма при приеме ВМК, содержащих витамины в дозах, соответствующих 100% от рекомендуемого суточного потребления (РСП), требуется от 1,5 мес. для витаминов группы В до 3–5 мес. для витамина D. Курсового приема ВМК в течение 1 мес. может быть недостаточно для коррекции дефицита всех витаминов.

После начала приема ВМК, содержащих микронутриенты в дозировках, приблизительно соответствующих 100% РНП, наблюдается постепенное увеличение концентрации микронутриентов в крови, собранной натощак после ночного голодания. Для витаминов группы В пик концентрации достигается в интервале от 4 до 6 недель, тогда как для витамина D этот период составляет от 12 до 20 недель. Для достижения максимального уровня в плазме крови при приеме витамина К<sub>2</sub> в дозе 60 мкг требуется не менее 6 недель, после прекращения приема концентрация снижается до исходного уровня в течение 2 недель, поэтому важен постоянный, а не курсовой прием этого витамина в дозах, сопоставимых с физиологической потребностью (Knapen et al., 2016).

Научно обоснованный выбор и режим приема ВМК, эффективных для поддержания оптимального микронутриентного статуса организма, должен базироваться на композиционном составе, дозах и формах микронутриентов, входящих в состав ВМК, а также рациональном режиме их применения.

***Критерии выбора ВМК, эффективных для поддержания оптимального микронутриентного статуса организма***

1. ВМК должен быть многокомпонентным, включать основные микронутриенты, недостаток которых обнаруживается у обследуемых.

2. Доза витаминов должна соответствовать физиологической потребности, т.е. составлять около 100% от РНП.

3. Формы минеральных веществ и витаминов должны обладать максимальной биодоступностью.

4. Прием ВМК должен быть ежедневным, а не курсовым.

Прекращение приема ВМК приводит к процессу элиминации витаминов, который можно сравнить с движением санок с горки, имеющей различную степень уклона: для витаминов группы В процесс «вымывания» происходит в течение 1–2 недель, что ассоциируется со скатыванием с крутой горки, в то время как для витамина D

элиминация занимает до 12 недель, что больше похоже на пологий склон. В конце концов происходит возврат обеспеченности организма к исходному уровню, который обеспечивает основное питание. Таким образом, приема ВМК в течение одного месяца может оказаться недостаточно для полной коррекции дефицита всех витаминов, а прекращение приема ВМК немедленно ведет к возобновлению дефицита микронутриентов до исходного дефицитного уровня.

Применительно к обогащенным микронутриентами пищевым продуктам и БАД к пище эффективность в значительной степени эквивалентна биодоступности конкретных микронутриентов, входящих в их состав (Коденцова, Вржесинская, 2006). Биодоступность микронутриента – это его доля, которая всосалась в кишечнике и используется для осуществления физиологических функций. Иногда абсорбцию, то есть способность микронутриента всасываться в кишечнике или степень его абсорбции, используют как синоним биодоступности, однако хорошая абсорбция – это лишь одно из необходимых условий хорошей биодоступности. Биодоступность зависит не только от степени всасывания, но и от включения абсорбированного микронутриента в метаболические процессы (в частности железа – в эритропоэз, кальция – для минерализации костей, витамина К<sub>2</sub> для карбоксилирования остеокальцина и т.д.). Кроме того, усвоение микронутриента из добавки в конечном итоге отражает его биодоступность из всего рациона, а не только из обогащенного пищевого носителя микронутриента. В результате биодоступность микронутриентов из рациона зависит от баланса между содержащимися в пище ингибиторами и усилителями всасывания.

Биодоступность минеральных элементов зависит от используемого химического соединения, входящего в состав ВМК. Показано, что биодоступность железа, магния из хелатов выше, чем из солей металлов. Биодоступность железа из хелата с бисглицинатом, оцененная по включению в эритроциты, в 3–4 раза превышает таковую для используемого в качестве эталона сульфата железа. Как установлено с использованием радиоизотопного <sup>57</sup>Fe, улучшение гематологических показателей при приеме бисглицината железа, сопоставимого с биодоступностью гемового Fe, достигается при более низких дозах, чем при использовании сульфата железа (Коденцова и др., 2023). Прием холекальциферола более эф-

фективен для улучшения статуса витамина D (уровней общего 25(OH)D и 25(OH)D<sub>3</sub> в сыворотке крови) и регулирования уровня паратиреоидного гормона (ПТГ) по сравнению с эргокальциферолом (витамин D<sub>2</sub>).

Согласно данным метаанализов ежедневное, постоянное воздействие витамина D в дозах, сопоставимых с физиологической потребностью, предпочтительнее, чем прерывистое ежемесячное воздействие чрезвычайно высоких доз для улучшения статуса этого витамина и достижения максимальной пользы, а именно устранения нарушений, обусловленных недостатком этого витамина (Коденцова и др., 2024).

Вышесказанное свидетельствует о необходимости принятия дополнительных мер для предотвращения неблагоприятных последствий (остеопороза, образования камней в почках, реактивации вирусов), особенно при длительных полетах. Они могут включать в себя обогащенное микронутриентами питание или, при необходимости, биологически активные добавки – дополнительные источники микронутриентов.

Разработка сбалансированного рациона с контролируемым потреблением витаминов, биологически активных веществ и продуктов, обладающих радиопротекторными свойствами, должна значительно снизить риски, с которыми сталкиваются космонавты во время космических полетов, избежать ряда патофизиологических изменений, таких как канцерогенез, деминерализация костей, дисфункция иммунной системы, снижение умственной и физической работоспособности и космическое укачивание.

Космическая пища должна быть устойчивой к температурным и механическим воздействиям, иметь длительный срок хранения, что требует использования для обогащения пищевых продуктов и блюд форм витаминов, обладающих повышенной устойчивостью, обеспечивающих максимальную сохранность в течение длительного срока годности продукта.

До настоящего времени должного внимания влиянию питания на физиологические изменения в организме космонавтов не уделялось. Предпринимаются попытки предотвратить эти изменения путем обогащения рациона космонавтов витаминами и минеральными веществами (Gao, Chilibeck, 2020). Исследования, оценивающие эффективность дополнительного приема кальция и витамина D во время космического полета или при использовании модели постельного режима

имеют ограничения по дизайну и отличаются малыми размерами выборки. Кроме того, продолжительность дополнительного приема витамина D и кальция были кратковременными, что не позволило выявить эффект.

Технологическое обогащение продуктов питания в ходе их изготовления витаминами, микро- и макроэлементами, пробиотиками, а также биоактивными компонентами (антиоксидантными соединениями) для удовлетворения потребностей в пищевых веществах – стратегия, позволяющая удовлетворить метаболические потребности членов экипажа космического корабля.

В настоящее время признано, что адекватное потребление кальция и прием витамина D во время космических миссий являются обязательными. Учитывая, что для осуществления витамином D физиологических функций необходима адекватная обеспеченность другими микронутриентами (Коденцова и др., 2024), участвующими в превращении витамина D в свою активную форму или в процессах остеогенеза, питание должно быть обогащено и другими микронутриентами.

## ВЫВОДЫ

1. Адаптация космонавтов к микрогравитации связана с неблагоприятными эффектами, проявляющимися в изменениях биохимических и физиологических показателей, в том числе с ухудшением микронутриентного статуса (снижение обеспеченности организма витаминами D, K, рядом минеральных веществ).

2. Фактический рацион космонавтов, сбалансированный по основным пищевым веществам, не всегда покрывает потребности организма космонавта в микронутриентах.

3. Микронутриентная плотность ряда традиционных блюд и продуктов космического питания должна быть повышена путем их обогащения витаминами.

4. Для восполнения недостаточного потребления микронутриентов с рационом во время длительного полета необходим ежедневный прием многокомпонентных ВМК, содержащих полный набор витаминов, в том числе витамин D (в дозе 800–1000 МЕ), витамин K<sub>2</sub>, все 8 витаминов группы B, в дозе соответствующей рекомендуемому суточному потреблению, а также магний (100 мг) в виде цитрата или хелата, кальций, калий.

5. Необходима разработка технологий (например, инкапсуляция), обеспечивающих со-

хран-ность витаминов при обогащении ими блюд и пищевых продуктов космического питания, а также входящих в состав ВМК.

6. В период предполетной подготовки обеспеченность членов экипажа должна быть доведена до оптимального уровня путем приема многокомпонентного ВМК с содержанием всех витаминов в дозе, соответствующей физиологической потребности, в течение длительного

времени (несколько месяцев). Обязательно использовать йодированную соль.

7. Оптимальное питание, включая полноценный витаминно-минеральный компонент, имеет первостепенное значение и в сочетании с физической активностью играет ключевую роль в смягчении многих состояний, обусловленных длительным пребыванием в космосе, в том числе потери костной и мышечной массы.

#### Конфликт интересов

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

#### Conflict of interest

The authors declare no obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

## ЛИТЕРАТУРА

- Коденцова В. М., Рисник Д. В., Мойсеёнок А. Г. Алгоритм эффективного применения витаминно-минеральных комплексов. Журнал Гродненского государственного медицинского университета. 2024; 22(2): 177–184. <https://doi.org/10.25298/2221-8785-2024-22-2-177-184>.
- Коденцова В.М., Вржесинская О.А. Витаминно-минеральные комплексы: соотношение доза – эффект. Вопросы питания. 2006; (1): 30–39.
- Коденцова В.М., Вржесинская О.А., Мазо В.К. Витамины и окислительный стресс. Вопросы питания. 2013; 82(3): 11–18.
- Коденцова В.М., Рисник Д.В. Микронутриентные метаболические сети и множественный дефицит микронутриентов: обоснование преимуществ витаминно-минеральных комплексов. Микроэлементы в медицине. 2020. 21(4): 3–20. DOI: 10.19112/2413-6174-2020-21-4-3-20.
- Коденцова В.М., Рисник Д.В., Бессонов В.В. Соединения железа для обогащения пищевых продуктов: сравнительный анализ эффективности. Микроэлементы в медицине. 2023; 24(1): 10–19. DOI: 10.19112/2413-6174-2023-24-1-10-19.
- Коденцова В.М., Рисник Д.В., Шарафетдинов Х.Х. Биодоступность и эффективность витаминно-минеральных комплексов. Микроэлементы в медицине. 2024; 25(1): 3–15. DOI: 10.19112/2413-6174-2024-25-1-3-15.
- Спиричев В.Б., Громова О.А. Витамин D и его синергисты. Земский врач. 2012; (2): 33–38.
- Austermann K, Baecker N, Zwart SR, Fimmers R, Stehle P, Smith SM, Heer M. Effects of antioxidant supplementation on bone mineral density, bone mineral content and bone structure in healthy men during 60 days of 6° head-down tilt bed rest: Results from a randomised controlled trial. Nutr Bull. 2023; 48(2): 256–266. doi: 10.1111/mbu.12619.
- Bergouignan A., Stein T.P., Habold C., Coxam V., Gorman D.O., Blanc S. Towards human exploration of space: The THESEUS review series on nutrition and metabolism research priorities. NPJ Microgravity. 2016; 2: 1–8. doi: 10.1038/npjmgrav.2016.29.
- Briguglio M. Nutritional Orthopedics and Space Nutrition as Two Sides of the Same Coin: A Scoping Review. Nutrients. 2021; 13(2): 483. doi: 10.3390/nu13020483.
- Bychkov A., Reshetnikova P., Bychkova E., Podgorbunskikh E., Koptev V. The current state and future trends of space nutrition from a perspective of astronauts' physiology. International Journal of Gastronomy and Food Science. 2021; 24. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100324>.
- Caillot-Augusseau A, Vico L, Heer M, Voroviev D, Souberbielle JC, Zitterman A, Alexandre C, Lafage-Proust MH. Space flight is associated with rapid decreases of undercarboxylated osteocalcin and increases of markers of bone resorption without changes in their circadian variation: observations in two cosmonauts. Clin Chem. 2000; 46(8 Pt 1): 1136–1143.
- Chaloulakou S, Pouliou KA, Karayiannis D. Physiological Alterations in Relation to Space Flight: The Role of Nutrition. Nutrients. 2022; 14(22): 4896. doi: 10.3390/nu14224896.
- Cialdai F, Bolognini D, Vignali L, Iannotti N, Cacchione S, Magi A, Balsamo M, Vukich M, Neri G, Donati A, Monici M, Capaccioli S, Lulli M. Effect of space flight on the behavior of human retinal pigment epithelial ARPE-19 cells and evaluation of coenzyme Q10 treatment. Cell Mol Life Sci. 2021; 78(23): 7795–7812. doi: 10.1007/s00018-021-03989-2.
- Coope M., Perchonok M. Douglas G.L. Initial assessment of the nutritional quality of the space food system over three years of ambient storage. NPJ Microgravity. 2017; 17: 3. <https://doi.org/10.1038/s41526-017-0022-z>.
- Dakkumadugula A, Pankaj L, Alqahtani AS, Ullah R, Ercisli S, Murugan R. Space nutrition and the biochemical changes caused in Astronauts Health due to space flight: A review. Food Chem X. 2023; 20: 100875. doi: 10.1016/j.fochx.2023.100875.
- Gao R., Chilibeck P. D. Nutritional interventions during bed rest and spaceflight: prevention of muscle mass and strength loss, bone resorption, glucose intolerance, and cardiovascular problems. Nutrition Research. 2020; 82: 11–24 <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2020.07.001>.

Gómez X, Sanon S, Zambrano K, Asquel S, Bassantes M, Morales JE, Otáñez G, Pomaquero C, Villarroel S, Zurita A, Calvache C, Celi K, Contreras T, Corrales D, Naciph MB, Peña J, Caicedo A. Key points for the development of antioxidant cocktails to prevent cellular stress and damage caused by reactive oxygen species (ROS) during manned space missions. *NPJ Microgravity*. 2021; 7(1): 35. doi: 10.1038/s41526-021-00162-8.

Knapen M.H., Braam L.A., Teunissen K.J., Van't Hoofd C.M., Zwijsen R.M., van den Heuvel E.G., et al. Steady-state vitamin K2 (menaquinone-7) plasma concentrations after intake of dairy products and soft gel capsules. *Eur J Clin Nutr*. 2016; 70(7): 831–836. DOI: 10.1038/ejcn.2016.3.

Macias B.R., Patel N.B., Gibson C.R., Samuels B.C., Laurie S.S., Otto C., Ferguson C.R., Lee S.M.C., Ploutz-Snyder R., Kramer L.A., Mader T.H., Brunstetter T., Stenger M.B. Association of Long-Duration Spaceflight with Anterior and Posterior Ocular Structure Changes in Astronauts and Their Recovery. *JAMA Ophthalmol*. 2020; 138(5): 553–559. doi: 10.1001/jamaophthalmol.2020.0673.

Mehare A., Chakole S., Wandile B. Navigating the Unknown: A Comprehensive Review of Spaceflight-Associated Neuro-Ocular Syndrome. *Cureus*. 2024; 16(2): e53380. doi: 10.7759/cureus.53380.

Mortazavi S.M.J., Sharif-Zadeh S, Mozdarani H., Foadi M., Haghani M., Sabet E. Future role of vitamin C in radiation mitigation and its possible applications in manned deep space missions: Survival study and the measurement of cell viability. *Physica Medica: European Journal of Medical Physics*. 2014; 3: e97. doi: 10.1016/j.ejmp.2014.07.278.

Ritieni A., Kyriacou M.C., Rouphael Y., De Pascale S. Iodine-biofortified microgreens as high nutraceutical value component of space mission crew diets and candidate for extraterrestrial cultivation. *Plants (Basel)*. 2023; 12(14): 2628. doi: 10.3390/plants12142628.

Seidler R.D., Stern C., Basner M., Stahn A.C., Wuyts F.L., Zu Eulenburg P. Future research directions to identify risks and mitigation strategies for neurostructural, ocular, and behavioral changes induced by human spaceflight: A NASA-ESA expert group consensus report. *Front Neural Circuits*. 2022; 16: 876789. doi: 10.3389/fncir.2022.876789.

Shea M.K., Berkner K.L., Ferland G., Fu X., Holden R.M., Booth S.L. Perspective: Evidence before Enthusiasm – A Critical Review of the Potential Cardiovascular Benefits of Vitamin K. *Adv Nutr*. 2021; 12(3): 632–646. doi: 10.1093/advances/nmab004.

Silver L., Mortazavi S.M.J. Biological Protection in Deep Space Missions. *J Biomed Phys Eng*. 2021; 11(6): 663–674. doi: 10.31661/jbpe.v0i0.1193.

Smith S.M., Heer M.A., Shackelford L.C., Sibonga J.D., Ploutz-Snyder L., Zwart S.R. Benefits for bone from resistance exercise and nutrition in long-duration spaceflight: Evidence from biochemistry and densitometry. *J Bone Miner Res*. 2012; 27(9): 1896–906. doi: 10.1002/jbmr.1647.

Smith S.M., Zwart S.R., Block G., Rice B.L., Davis-Street J.E. The nutritional status of astronauts is altered after long-term space flight aboard the International Space Station. *J Nutr*. 2005; 135(3): 437–443. doi: 10.1093/jn/135.3.437.

Smith SM, Zwart SR. Spaceflight-related ocular changes: the potential role of genetics, and the potential of B vitamins as a countermeasure. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care*. 2018; 21: 481–488. doi: 10.1097/MCO.0000000000000510.

Sonar C.R., Parhi A., Liu F., Patel J., Rasco B., Tang J., Sablani S.S. Investigating thermal and storage stability of vitamins in pasteurized mashed potatoes packed in barrier packaging films. *Food Packaging and Shelf Life*. 2020; 24: 100486.

Tang H., Rising H.H., Majji M., Brown R.D. Long-Term Space Nutrition: A Scoping Review. *Nutrients*. 2021; 14(1): 194. doi: 10.3390/nu14010194.

Tocci D., Ducai T., Stoute C.A.B., Hopkins G., Sabbir M.G., Beheshti A., Albensi B.C. Monitoring inflammatory, immune system mediators, and mitochondrial changes related to brain metabolism during space flight. *Front Immunol*. 2024; 15: 1422864. doi: 10.3389/fimmu.2024.1422864.

Wang H., Ma Y. The potential of vitamin K as a regulatory factor of bone metabolism. A review. *Nutrients*. 2023; 15(23): 4935. doi: 10.3390/nu15234935.

Zheng M., Charvat J., Zwart S.R., Mehta S.K., Crucian B.E., Smith S.M., He J., Piermarocchi C. and Mias G.I. Time-resolved molecular measurements reveal changes in astronauts during spaceflight. *Front. Physiol*. 2023; 14: 1219221. doi: 10.3389/fphys.2023.1219221.

Zwart S.R., Rice B.L., Dlouhy H., Shackelford L.C., Heer M., Koslovsky M.D., Smith S.M. Dietary acid load and bone turnover during long-duration spaceflight and bed rest. *Am J Clin Nutr*. 2018; 107(5): 834–844. DOI: 10.1093/ajcn/nqy029.

## MICRONUTRIENTS IN THE NUTRITION OF ASTRONAUTS

**D.V. Risnik<sup>1</sup>, V.M. Kodentsova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Moscow State University M.V. Lomonosov,  
Lenin Hills, d. 1, page 12, Moscow, 119234,

<sup>2</sup> Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety,  
Ustyinskiy proezd, d. 2/14, Moscow, 109240, Russian Federation

**ABSTRACT.** Space nutrition (products and dishes created specifically for astronauts) to ensure optimal physiological and psychological state must satisfy the daily needs of the astronaut's body not only in macronutrients (protein, fats, carbohydrates), but also in micronutrients.

**The objective** of the review is assessment of the consumption and sufficiency of astronauts with micronutrients during long-term space missions and justification of the need to increase the micronutrient value of space nutrition

**Results.** The calculation of the consumption of iron, zinc, calcium, potassium during the space missions is close to the recommended daily intake, while the consumption of minerals in some crew members may not reach the recommended norms. The actual diet of astronauts, balanced in terms of essential nutrients, does not always cover the astronaut's body's needs for micronutrients. An assessment of the sufficiency with vitamins and minerals by means of the blood or urine level shows that by the end of a long-duration spaceflight, the micronutrient status worsens. The blood concentration of vitamins D, K, folates, potassium, magnesium decreases, the level of biomarkers of collagen degradation increases, and the mineral density of bone tissue decreases. Taken together, the studies indicate that the vitamin composition of the astronauts' diet is inadequate, both in the pre-flight period and in space nutrition during the flight. Changes in the micronutrient status of astronauts that occurred during the flight persist for a long time or after returning to Earth even worsen.

**Conclusion.** During the preflight period, the micronutrient status of the crew members should be brought to the optimal level by taking vitamin-mineral supplement (VMS) containing all the vitamins in a dose corresponding to the physiological need for a long time (several months). The micronutrient density of traditional dishes and space food products should be increased by enriching them with vitamins. To compensate for the insufficient consumption of micronutrients with the diet during a long-term flight, daily intake of multicomponent VMS containing deficient micronutrients is necessary. It is necessary to develop technologies (for example, encapsulation) that ensure the preservation of vitamins when enriching dishes and food products for space nutrition.

**KEYWORDS:** vitamin, mineral, astronaut, micronutrient sufficiency, vitamin-mineral supplement.

**For citation:** Risnik D.V., Kodentsova V.M. Micronutrients in the nutrition of astronauts. Trace elements in medicine. 2025;26(1):3–16. DOI: 10.19112/2413-6174-2025-26-1-3-16

## REFERENCES

- Kodentsova V.M., Risnik D.V., Moiseenok A.G. Algorithm for effective application of vitamin-mineral complexes. Journal of the Grodno State Medical University. 2024; 22(2): 177–184. <https://doi.org/10.25298/2221-8785-2024-22-2-177-184> (In Russ.).
- Kodentsova V.M., Vrzhesinskaya O.A. Multivitamin-mineral complexes «dosa – effect» correlation. Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]. 2006; 75(1): 30–39 (In Russ.).
- Kodentsova V.M., Vrzhesinskaya O.A., Mazo V.K. Vitamins and oxidative stress. Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]. 2013; 82(3): 11–18 (In Russ.).
- Kodentsova V.M., Risnik D.V. Micronutrient metabolic networks and multiple micronutrient deficiency: a rationale for the advantages of vitamin-mineral supplements. Trace elements in medicine. 2020. 21(4): 3–20. DOI: 10.19112/2413-6174-2020-21-4-3-20 (In Russ.).
- Kodentsova V.M., Risnik D.V., Bessonov V.V. Iron compounds for food fortification: comparative analysis of efficiency. Trace elements in medicine. 2023; 24(1): 10–19. DOI: 10.19112/2413-6174-2023-24-1-10-19 (In Russ.).
- Kodentsova V.M., Risnik D.V., Sharafetdinov Kh.Kh. Bioavailability and effectiveness of vitamin-mineral supplements. Trace elements in medicine. 2024; 25(1):3– 15. DOI: 10.19112/2413-6174-2024-25-1-3-15 (In Russ.).
- Spirichev V.B., Gromova O.A. Vitamin D and its synergists. Zemskij vrach. 2012; 2: 33–38 (In Russ.).
- Austermann K., Baecker N., Zwart S.R., Fimmers R., Stehle P., Smith S.M., Heer M. Effects of antioxidant supplementation on bone mineral density, bone mineral content and bone structure in healthy men during 60 days of 6° head-down tilt bed rest: Results from a randomised controlled trial. Nutr Bull. 2023; 48(2): 256–266. doi: 10.1111/nbu.12619.
- Bergouignan A., Stein T.P., Habold C., Coxam V., Gorman D.O., Blanc S. Towards human exploration of space: The THE-SEUS review series on nutrition and metabolism research priorities. NPJ Microgravity. 2016; 2: 1–8. doi: 10.1038/npjmgrav.2016.29.
- Briguglio M. Nutritional Orthopedics and Space Nutrition as Two Sides of the Same Coin: A Scoping Review. Nutrients. 2021; 13(2): 483. doi: 10.3390/nu13020483.
- Bychkov A., Reshetnikova P., Bychkova E., Podgorbunskikh E., Koptev V. The current state and future trends of space nutrition from a perspective of astronauts' physiology. International Journal of Gastronomy and Food Science. 2021; 24. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100324>.
- Caillot-Augusseau A., Vico L., Heer M., Voroviev D., Souberbielle J.C., Zitterman A., Alexandre C., Lafage-Proust M.H. Space flight is associated with rapid decreases of undercarboxylated osteocalcin and increases of markers of bone resorption without changes in their circadian variation: observations in two cosmonauts. Clin Chem. 2000; 46(8 Pt 1): 1136–1143.
- Chaloulakou S., Pouliou K.A., Karayiannis D. Physiological Alterations in Relation to Space Flight: The Role of Nutrition. Nutrients. 2022; 14(22): 4896. doi: 10.3390/nu14224896.
- Cialdai F., Bolognini D., Vignali L., Iannotti N., Cacchione S., Magi A., Balsamo M., Vukich M., Neri G., Donati A., Monici M., Capaccioli S., Lulli M. Effect of space flight on the behavior of human retinal pigment epithelial ARPE-19 cells and evaluation of coenzyme Q10 treatment. Cell Mol Life Sci. 2021; 78(23): 7795–7812. doi: 10.1007/s00018-021-03989-2.

- Coope M., Perchonok M., Douglas G.L. Initial assessment of the nutritional quality of the space food system over three years of ambient storage. *NPJ Microgravity*. 2017; 17: 3. <https://doi.org/10.1038/s41526-017-0022-z>.
- Dakkumadugula A., Pankaj L., Alqahtani AS., Ullah R., Ercisli S., Murugan R. Space nutrition and the biochemical changes caused in Astronauts Health due to space flight: A review. *Food Chem X*. 2023; 20: 100875. doi: 10.1016/j.fochx.2023.100875.
- Gao R., Chilibeck P. D. Nutritional interventions during bed rest and spaceflight: prevention of muscle mass and strength loss, bone resorption, glucose intolerance, and cardiovascular problems. *Nutrition Research*. 2020; 82: 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2020.07.001>.
- Gómez X., Sanon S., Zambrano K., Asquel S., Bassantes M., Morales JE., Otáñez G., Pomaquero C., Villarroel S., Zurita A., Calvache C., Celi K., Contreras T., Corrales D., Naciph MB., Peña J., Caicedo A. Key points for the development of antioxidant cocktails to prevent cellular stress and damage caused by reactive oxygen species (ROS) during manned space missions. *NPJ Microgravity*. 2021; 7(1): 35. doi: 10.1038/s41526-021-00162-8.
- Knapen M.H., Braam L.A., Teunissen K.J., Van't Hoofd C.M., Zwijsen R.M., van den Heuvel E.G., et al. Steady-state vitamin K2 (menaquinone-7) plasma concentrations after intake of dairy products and soft gel capsules. *Eur J Clin Nutr*. 2016; 70(7): 831–836. DOI: 10.1038/ejcn.2016.3.
- Macias B.R., Patel N.B., Gibson C.R., Samuels B.C., Laurie S.S., Otto C., Ferguson C.R., Lee S.M.C., Ploutz-Snyder R., Kramer L.A., Mader T.H., Brunstetter T., Stenger M.B. Association of Long-Duration Spaceflight with Anterior and Posterior Ocular Structure Changes in Astronauts and Their Recovery. *JAMA Ophthalmol*. 2020; 138(5): 553–559. doi: 10.1001/jamaophthalmol.2020.0673.
- Mehare A., Chakole S., Wandile B. Navigating the Unknown: A Comprehensive Review of Spaceflight-Associated Neuro-Ocular Syndrome. *Cureus*. 2024; 16(2): e53380. doi: 10.7759/cureus.53380.
- Mortazavi S.M.J., Sharif-Zadeh S., Mozdarani H., Foadi M., Haghani M., Sabet E. Future role of vitamin C in radiation mitigation and its possible applications in manned deep space missions: Survival study and the measurement of cell viability. *Physica Medica: European Journal of Medical Physics*. 2014; 3: e97. doi: 10.1016/j.ejmp.2014.07.278.
- Ritieni A., Kyriacou M.C., Rouphael Y., De Pascale S. Iodine-biofortified microgreens as high nutraceutical value component of space mission crew diets and candidate for extraterrestrial cultivation. *Plants (Basel)*. 2023; 12(14): 2628. doi: 10.3390/plants12142628.
- Seidler R.D., Stern C., Basner M., Stahn A.C., Wuyts F.L., Zu Eulenburg P. Future research directions to identify risks and mitigation strategies for neurostructural, ocular, and behavioral changes induced by human spaceflight: A NASA-ESA expert group consensus report. *Front Neural Circuits*. 2022; 16: 876789. doi: 10.3389/fncir.2022.876789.
- Shea M.K., Berkner K.L., Ferland G., Fu X., Holden R.M., Booth S.L. Perspective: Evidence before Enthusiasm – A Critical Review of the Potential Cardiovascular Benefits of Vitamin K. *Adv Nutr*. 2021; 12(3): 632–646. doi: 10.1093/advances/nmab004.
- Sihver L., Mortazavi S.M.J. Biological Protection in Deep Space Missions. *J Biomed Phys Eng*. 2021; 11(6): 663–674. doi: 10.31661/jbpe.v0i0.1193.
- Smith S.M., Heer M.A., Shackelford L.C., Sibonga J.D., Ploutz-Snyder L., Zwart S.R. Benefits for bone from resistance exercise and nutrition in long-duration spaceflight: Evidence from biochemistry and densitometry. *J Bone Miner Res*. 2012; 27(9): 1896–906. doi: 10.1002/jbmr.1647.
- Smith S.M., Zwart S.R., Block G., Rice B.L., Davis-Street J.E. The nutritional status of astronauts is altered after long-term space flight aboard the International Space Station. *J Nutr*. 2005; 135(3): 437–443. doi: 10.1093/jn/135.3.437.
- Smith SM, Zwart SR. Spaceflight-related ocular changes: the potential role of genetics, and the potential of B vitamins as a countermeasure. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care*. 2018; 21: 481–488. doi: 10.1097/MCO.0000000000000510.
- Sonar C.R., Parhi A., Liu F., Patel J., Rasco B., Tang J., Sablani S.S. Investigating thermal and storage stability of vitamins in pasteurized mashed potatoes packed in barrier packaging films. *Food Packaging and Shelf Life*. 2020; 24: 100486.
- Tang H., Rising H.H., Majji M., Brown R.D. Long-Term Space Nutrition: A Scoping Review. *Nutrients*. 2021; 14(1): 194. doi: 10.3390/nu14010194.
- Tocci D., Ducai T., Stoute C.A.B., Hopkins G., Sabbir M.G., Beheshti A., Albensi B.C. Monitoring inflammatory, immune system mediators, and mitochondrial changes related to brain metabolism during space flight. *Front Immunol*. 2024; 15: 1422864. doi: 10.3389/fimmu.2024.1422864.
- Wang H., Ma Y. The potential of vitamin K as a regulatory factor of bone metabolism. A review. *Nutrients*. 2023; 15(23): 4935. doi: 10.3390/nu15234935.
- Zheng M., Charvat J., Zwart S.R., Mehta S.K., Crucian B.E., Smith S.M., He J., Piermarocchi C. and Mias G.I. Time-resolved molecular measurements reveal changes in astronauts during spaceflight. *Front. Physiol*. 2023; 14: 1219221. doi: 10.3389/fphys.2023.1219221.
- Zwart S.R., Rice B.L., Dlouhy H., Shackelford L.C., Heer M., Koslovsky M.D., Smith S.M. Dietary acid load and bone turnover during long-duration spaceflight and bed rest. *Am J Clin Nutr*. 2018; 107(5): 834–844. DOI: 10.1093/ajcn/nqy029.