

УДК 612.1

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КРОВИ В УСЛОВИЯХ НЕВЕСОМОСТИ С ПОМОЩЬЮ ПОРТАТИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДОПЛЕРОВСКИХ ФЛОУМЕТРОВ

Дунаев А.В.¹, Локтионова Ю.И.¹, Жарких Е.В.¹, Федорович А.А.^{2,3}, Сидоров В.В.⁴,
Васин А.В.⁵, Дубинин В.И.⁵

¹Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева

²Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины, Москва

³Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

⁴ООО НПП «ЛАЗМА», Москва

⁵Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина, Звездный городок, Московская область

E-mail: dunaev@bmecenter.ru

В работе впервые представлены результаты исследования микроциркуляции крови в условиях невесомости, полученные с помощью портативных лазерных анализаторов «ЛАЗМА ПФ». С привлечением членов экипажа – участников исследований (космонавт № 1 и космонавт № 2) выполнены наземные и бортовые (9 сут) сеансы измерений в течение 8 мин с использованием 2 носимых флоуметров, закрепленных симметрично на коже височных областей головы, ладонных поверхностей дистальных фаланг III пальцев рук, наружных поверхностей предплечий и подошвенных поверхностей дистальных фаланг I пальцев стоп.

Выявлено снижение средней величины перфузии (более чем в 2 раза) в пальцах ног у космонавта № 1 из-за перераспределения крови в верхнюю часть тела в первые 2–3 сут полета с дальнейшей адаптацией в виде повышения перфузии до средних значений наземных условий. У космонавта № 2 в результате применения профилактического средства, создающего компрессию в проксимальных областях нижних конечностей с целью искусственного депонирования в них крови, были отмечены высокоамплитудные колебания частотой около 1/мин (НО-зависимые). У космонавта № 1 в первые 2–3 сут полета на фоне естественной адаптации отмечались высокоамплитудные эндотелиальные вазомоции частотой 1 колебание в 3–4 мин, что предположительно связано с действием эндотелиального гиперполяризующего фактора. В целом в процессе перестройки системы микроциркуляции крови в условиях микрогравитации наиболее выраженные изменения параметров происходили в височной области головы и в области нижних конечностей на 2-е и 3-и сутки полета и характеризовались значимым снижением тканевой перфузии, повышением сосудистого тонуса с постепенным восстановлением предполетных значений к 6-м суткам космического полета (КП).

Впервые предложена методика исследования в условиях КП и получены данные о состоянии микроциркуляции крови космонавтов в период острой адаптации к

условиям микрогравитации и реадaptации после завершения КП.

Ключевые слова: космический полет, микроциркуляция крови, тканевая перфузия, лазерная доплеровская флоуметрия, портативные приборы, невесомость, микрогравитация.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2024. Т. 58. № 1. С. 47–54.

DOI: 10.21687/0233-528X-2024-58-1-47-54

С самого начала освоения человеком космоса существенное значение придается изучению влияния невесомости (микрогравитации) на сердечно-сосудистую систему [1–4]. Известно много работ, основанных как на математическом [5, 6], так и на экспериментальном моделировании эффектов невесомости в наземных условиях с помощью «сухой» иммерсии [7] или антиортостатической гипокинезии (АНОГ) [8, 9]. Стоит отметить, что в последнее время наблюдается все больший интерес к изучению микроциркуляторных процессов при влиянии факторов космического полета (КП) с оценкой состояния периферической гемодинамики верхних и нижних конечностей человека с помощью «сухой» иммерсии, но с длительностью экспериментов не более 5 сут [10]. Особый интерес представляет исследование системы микроциркуляции крови (МЦК) нижних конечностей и головы, поскольку при микрогравитации имеет место перераспределение крови в краниальном направлении [2]. Данная гемодинамическая ситуация в наземных условиях моделировалась с применением методики АНОГ при наклоне головы на уровне -6° [11]. В случае моделирования эффектов невесомости при параболических полетах авторами оценивался хориоидальный кровоток [11].

Ранее коллективу авторов [12, 13] впервые удалось провести регистрацию параметров МЦК в

условиях КП с помощью широко распространенного в клинично-лабораторных исследованиях метода лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) [14] и выявить нарушение функции эндотелия на фоне снижения базального уровня тканевой перфузии в одной локальной области. Авторы не оценивали изменения МЦК в других областях для выявления системных изменений микрогемодинамики в условиях КП. Кроме того, указанное пилотное исследование было проведено только на коже предплечья с оценкой изменений лишь среднего уровня тканевой перфузии без анализа механизмов регуляции микрокровотока. В то же время проведенные на Земле исследования демонстрируют, что результаты наземных экспериментов с моделированием условий невесомости не всегда в полной мере отражают изменения, происходящие в сердечно-сосудистой системе человека в реальных условиях невесомости на Международной космической станции (МКС) [15].

В последнее время благодаря созданию миниатюрных источников лазерного излучения (прежде всего VCSEL-лазеров) сделан значительный прорыв в исследованиях состояния системы МЦК – разработаны портативные анализаторы МЦК «ЛАЗМА ПФ» (ООО НПП «ЛАЗМА», Россия), реализующие метод ЛДФ и контроль температуры области исследований, работающие без оптоволоконного зонда и передающие данные измерений на персональный компьютер по радиочастотным каналам связи (Bluetooth, Wi-Fi). Данные портативные флоуметры постепенно находят все большее применение в медицинской практике при диагностике расстройств МЦК, связанных с сахарным диабетом, гипертонией и сосудистыми осложнениями коронавируса, а также прошли апробацию при оценке статуса курения и в оценке качества выполнения дыхательных упражнений [16].

Цель данной работы – оценка изменений микрогемодинамики в коже головы, верхних и нижних конечностях методом ЛДФ в условиях реального КП с помощью портативных анализаторов МЦК.

Методика

Портативный анализатор МЦК «ЛАЗМА ПФ» выполнен в виде компактного носимого устройства, которое может быть удобно размещено для проведения измерений на любом участке тела, включая голову, верхние и нижние конечности. В представленной работе анализируются результаты только ЛДФ-канала прибора, у которого имеется также канал флуоресцентной спектроскопии (ФС) для оценки окислительного метаболизма в области исследований. Внешний вид передней и задней панелей анализатора представлен на рис. 1.

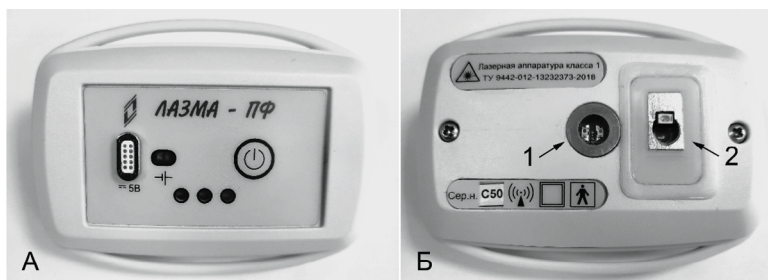


Рис. 1. Внешний вид носимого анализатора.

А – передняя часть; Б – контактная часть (1 – окно ЛДФ-канала; 2 – окно ФС-канала)

ЛДФ-канал с длиной волны зондирования 850 нм (мощность излучения – не более 0,8 мВт) регистрирует тканевую перфузию примерно в 1,5–2,0 мм³ кожи, регистрируемый параметр – показатель микроциркуляции (ПМ) крови, определяемый в условных перфузионных единицах (пф. ед.). Программное обеспечение позволяет анализировать 5 типов осцилляций микрокровотока в широком диапазоне частот (0,0095–2 Гц), параметры которых рассчитываются с помощью математического аппарата вейвлет-преобразования. Колебания тканевой перфузии обусловлены результатом одновременной работы различных регуляторных механизмов: эндотелиального (Э) 0,0095–0,02 Гц, нейрогенного (Н) 0,02–0,06 Гц и миогенного (М) 0,06–0,16 Гц, дыхательного (Д) 0,16–0,4 Гц и сердечного (С) 0,4–1,6 Гц [14, 17, 18].

В работе описываются результаты, полученные при проведении космического эксперимента (КЭ) SFP-MCS «ЛАЗМА» по исследованию МЦК и флуоресценции биотканей в условиях невесомости (микрогравитации) на борту МКС (модуль «Наука» российского сегмента (РС) МКС) во время ее посещения (ЭП-20, 8–20 декабря 2021 г.) 2 космическими туристами (без опыта КП) и бортинженером (профессиональным космонавтом) [16]. Все испытуемые подписали Информированное согласие на участие в эксперименте, согласно протоколу о намерении совместного участия в исследованиях ФГБУ «НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина» от 10.11.2021 г. Выполнены наземные (9 – до, 5 – после КП) и бортовые (9) ежедневные сеансы регистрации параметра МЦК в течение 8 мин с использованием носимого анализатора «ЛАЗМА ПФ» космонавтом и одним из космических туристов. Регистрация параметров МЦК осуществлялась 2 флоуметрами симметрично в 4 зонах: височная область головы, наружная поверхность предплечий на 2 см выше шиловидных отростков локтевых костей, ладонная поверхность дистальных фаланг III пальцев кистей и подошвенная поверхность дистальных фаланг I пальцев стоп. Стоит отметить, что за сутки до старта

и в день приземления, а также в первые и последние сутки КП измерения не проводились. Во время КП обеспечивалась ежедневная отправка зарегистрированных данных на Землю для их анализа, что позволяло оценивать процессы перестройки и адаптации системы МЦК в условиях реального КП у космонавтов.

В качестве исходных (предполетных) значений использовались результаты измерений, проведенных на Земле во время подготовки экипажа к КП на космодроме Байконур. Реадаптация организма к условиям гравитации Земли оценивалась во время нахождения экипажа в ФГБУ «НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина» после приземления, начиная со 2-х суток. Во время наземных этапов исследования проводились в положении лежа на кушетке при комнатной температуре (23–24 °С), во время КП (модуль «Наука» РС МКС) – в свободном положении тела при температуре 21–23 °С (при относительной влажности 40–50 % и атмосферном давлении 743 мм рт. ст.), на всех этапах измерения осуществлялись примерно в одно и то же время суток (как минимум через 2 ч после приема пищи и с 15-минутным периодом адаптации). К ограничениям КЭ можно отнести несколько неполных или некорректно (с «промахами») зарегистрированных данных в нескольких областях у обоих космонавтов как на предполетном этапе, так и после КП (послеполетные измерения на космонавте № 2 проводились в течение 2 сут). В статье приводится анализ данных по левой стороне тела, так как они были получены в полном объеме.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведена динамика среднего уровня тканевой перфузии во всех исследуемых областях на протяжении всего КЭ «ЛАЗМА» (точками обозначены усредненные значения тканевой перфузии за 8 мин с отложенными среднеквадратическими отклонениями).

Из представленных на рис. 2 данных видно, что в процессе адаптации системы МЦК к условиям микрогравитации наиболее выраженные изменения тканевой перфузии отмечаются в первые 3–4 сут КП для висков (космонавты № 1 и № 2) и пальцев ног (космонавт № 1), заключающиеся в первоначальном снижении среднего уровня ПМ с последующим возвращением до уровня предполетных значений на 6–7-е сутки КП.

Стоит отметить, что наблюдаемый большой разброс (около 30–40 % во всех участках) средней перфузии на предполетном этапе связан с интенсивными подготовительными работами космонавтов (вестибулярные тренировки, тренировки на ортостоле и др.), причем зачастую, ввиду плотного графика космонавтов, тренировки осуществлялись

за 1–2 ч до проведения регистрации перфузии. Однако даже данное ограничение в исследовании позволяет увидеть основные тенденции изменений средней перфузии во всех 4 участках организма человека, а именно ее уменьшение (например, более чем в 2 раза в I пальце стопы) на 2–3-и сутки КП с последующим ее резким увеличением к 5–6-м суткам КП (процесс адаптации к условиям невесомости при КП). В меньшей степени данные изменения проявляются в области кожи предплечья, что может быть связано как с расположением данной области в центральной плоскости тела, так и с активным использованием рук космонавтами в процессе КП. Кроме того, данная область подвергается меньшим гемодинамическим перестройкам, чем микроциркуляторное русло стоп или висков, и отличается ангиоархитектоникой микроциркуляторного русла, характеризующейся гемодинамически незначительным количеством артериоло-венулярных анастомозов и преимущественно нутритивной функцией микрокровотока.

Анализ изменений показателя МЦК и амплитуд колебаний кровотока, характеризующих механизмы регуляции, проведен во время КП для височной области головы и подошвенной поверхности дистальной фаланги I пальца стопы космонавта № 1 для 1-х суток дополетных исследований (гравитационное поле Земли), 2-х и 6-х суток КП (рис. 3).

Из представленных на рис. 3, А данных видно, что в «острую» фазу функциональной перестройки системы МЦК (2-е сутки КП) уровень тканевой перфузии в области подошвенной поверхности стоп снижается почти в 2 раза относительно усредненных наземных значений (пример зарегистрированного показателя МЦК в наземных условиях взят для 1-х суток предполетных измерений ввиду последующего повышения интенсивности тренировок перед полетом), что, вероятнее всего, обусловлено перемещением крови от нижних конечностей в краниальном направлении.

На 6-е сутки КП уровень тканевой перфузии увеличивается почти в 5 раз относительно 2-х суток КП и превышает значения в условиях гравитационного поля Земли почти в 2 раза, что можно считать проявлением процесса адаптации системы МЦК к условиям невесомости.

Представляет интерес изменение активности механизмов регуляции тканевой перфузии при наземных измерениях и во время КП. По результатам амплитудно-частотного вейвлет-анализа колебаний кровотока в нижних конечностях (см. рис. 3, В) можно сделать заключение, что при изменении гравитации амплитуды тонус-формирующих механизмов модуляции микрокровотока (эндотелиальный, нейрогенный, миогенный) снижаются, что можно расценивать как повышение тонуса сосудов вследствие действия данных регуляторных

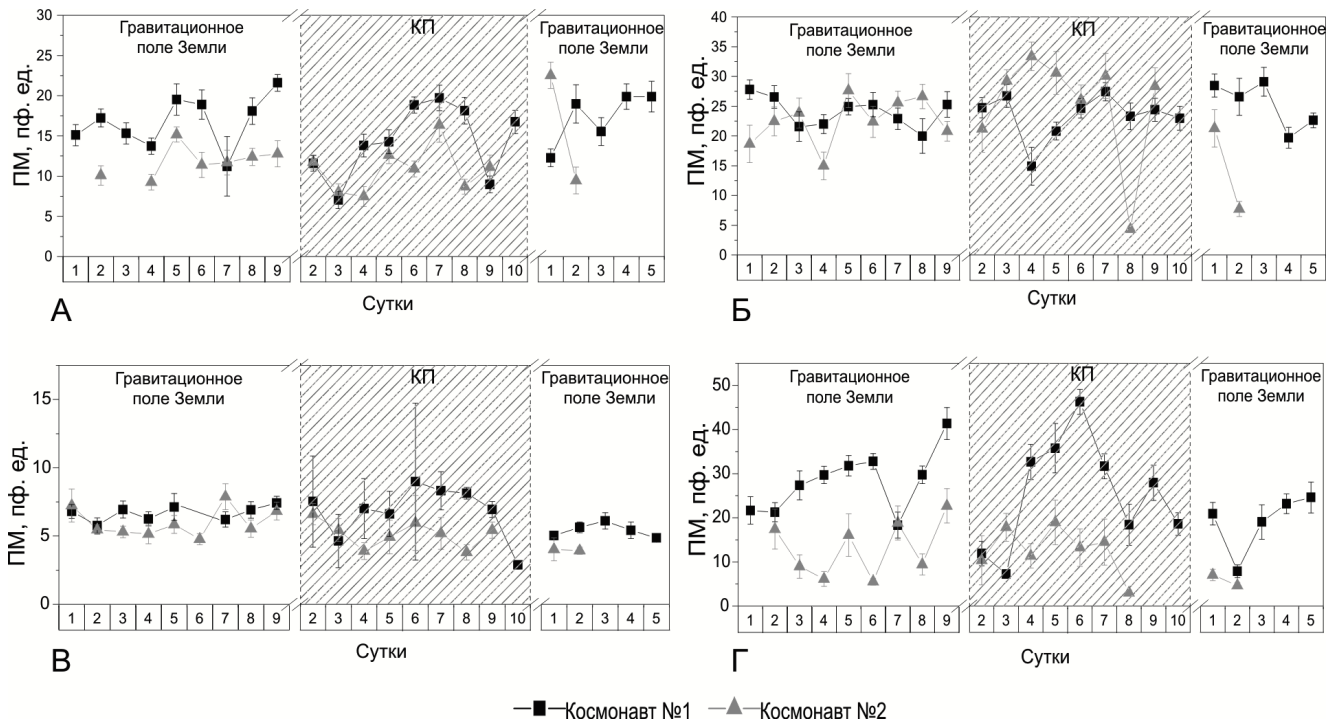


Рис. 2. Динамика среднего уровня тканевой перфузии на протяжении всего КЭ «ЛАЗМА». А – в области висков; Б – в ладонной области дистальной фаланги III пальца кисти руки; В – в области наружной поверхности предплечья; Г – в области подошвенной поверхности дистальной фаланги I пальца стопы

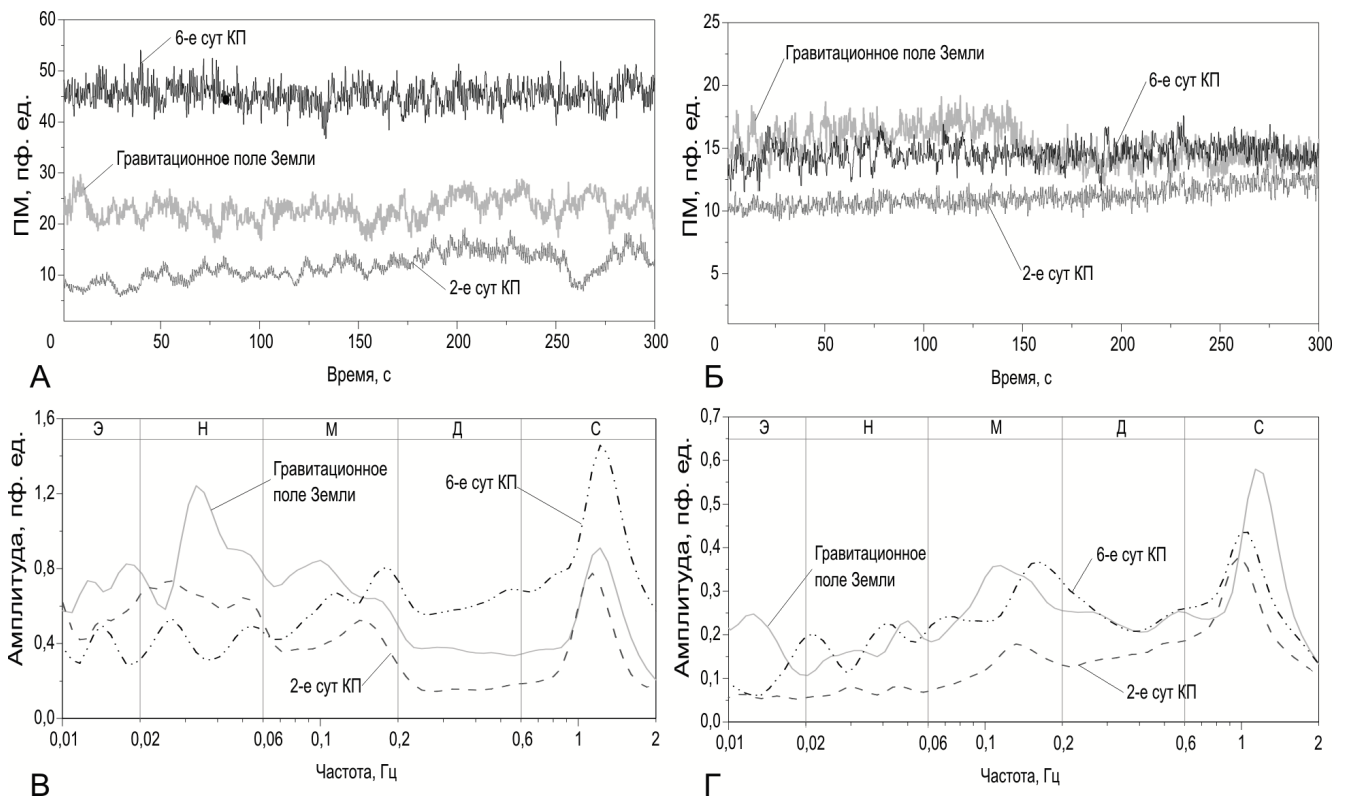


Рис. 3. Показатель микроциркуляции крови и результаты амплитудно-частотного вейвлет-анализа колебаний микрокровотока на различных этапах КЭ (гравитационное поле Земли, 2-е и 6-е сутки КП) для космонавта № 1. А – ПМ в подошвенной поверхности дистальной фаланги I пальца стопы; Б – ПМ в височной области головы; В – вейвлет-спектр в подошвенной поверхности дистальной фаланги I пальца стопы; Г – вейвлет-спектр колебаний в височной области головы

механизмов [14]. На этом фоне амплитуда сердечных колебаний микрокровотока, которая определяет объемное кровенаполнение микрососудистого русла, на 2-е сутки КП снижается, а на 6-е сутки возрастает, превышая значения, зарегистрированные при наземных измерениях. На 6-е сутки КП высокий уровень тканевой перфузии обусловлен повышенным притоком артериальной крови по сравнению со 2-ми сутками КП. Функциональная перестройка регуляторных механизмов модуляции микрокровотока направлена на поддержание тканевого гомеостаза в новых для организма условиях функционирования.

В данном контексте интересны результаты реакции тканевой перфузии в коже висков (см. рис. 3, Б), так как ввиду перемещения крови в краниальном направлении во время КП данная область подвергается наибольшему гемодинамическим нагрузкам. В «острую» фазу функциональной перестройки системы МЦК (2-е сутки КП) уровень тканевой перфузии в височной области головы снижается почти в 1,5 раза относительно наземных значений с последующим восстановлением до предполетных значений на 6-е сутки КП. Амплитудно-частотный вейвлет анализ зарегистрированных данных (см. рис. 3, Г) демонстрирует снижение активности всех механизмов регуляции МЦК на 2-е сутки КП с наиболее значимыми изменениями в эндотелиальном и нейрогенном диапазонах и постепенное восстановление параметров к 6-м суткам.

На рис. 4 приведены результаты исследований тканевой перфузии в области подошвенной поверхности дистальной фаланги I пальца стопы и ладонной поверхности дистальной фаланги III пальца руки с амплитудно-частотным вейвлет-анализом колебаний для космонавтов № 1 и № 2 на 3-и сутки КП. Данные области кожи имеют схожее строение микрососудистого русла, характеризующееся обилием поверхностно расположенных артериоло-венулярных анастомозов, в которых доминирует нейрогенный механизм регуляции тонуса микрососудов, но в условиях микрогравитации пальцы рук и ног испытывают различные гемодинамические нагрузки.

Стоит отметить, что космонавт № 1 адаптировался к условиям микрогравитации без компенсаторных устройств, а космонавт № 2 применял специальное профилактическое средство «Браслет» [19], которое снижает перемещение крови от нижних конечностей в краниальном направлении. Как видно на рис. 4, А, у космонавта № 2 на фоне применения компенсаторного средства «Браслет» в нижних конечностях отмечаются высокоамплитудные колебания кровотока частотой около 1 колебания в

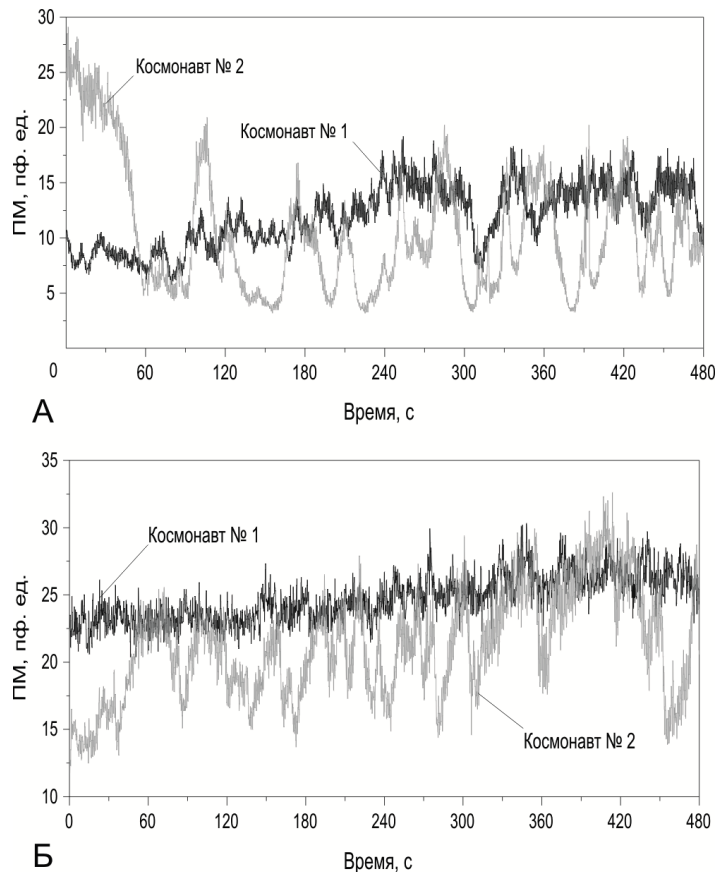


Рис. 4. Показатель микроциркуляции крови у космонавтов на 3-и сутки КП.
А – для I пальца стопы; Б – для III пальца руки

минуту, которые обусловлены NO-опосредованной регуляцией микрососудистого эндотелия. У космонавта № 1 (без применения компенсаторного средства «Браслет») в нижних конечностях отмечаются высокоамплитудные вазомоции частотой 1 раз в 3–4 мин, что, предположительно, связывают с эндотелиальным гиперполяризующим фактором [17]. В пальцах рук у космонавта № 2, как и в ногах, отмечается высокая вазомоторная активность всех тонус-формирующих механизмов (см. рис. 4, Б). На ЛДФ-грамме отчетливо видны высокоамплитудные колебания эндотелиального, нейрогенного и миогенного механизмов модуляции микрокровотока. У космонавта № 1 вазомоторная активность ниже, но уровень тканевой перфузии незначительно выше.

На основании представленных данных можно предположить, что применение средств нормализации перераспределения крови во время КП приводит к увеличению вазомоторной активности тонус-формирующих механизмов регуляции кровотока.

Дополнительно была оценена динамика изменений амплитуд регуляторных механизмов тканевой перфузии на протяжении всего КЭ. Результаты

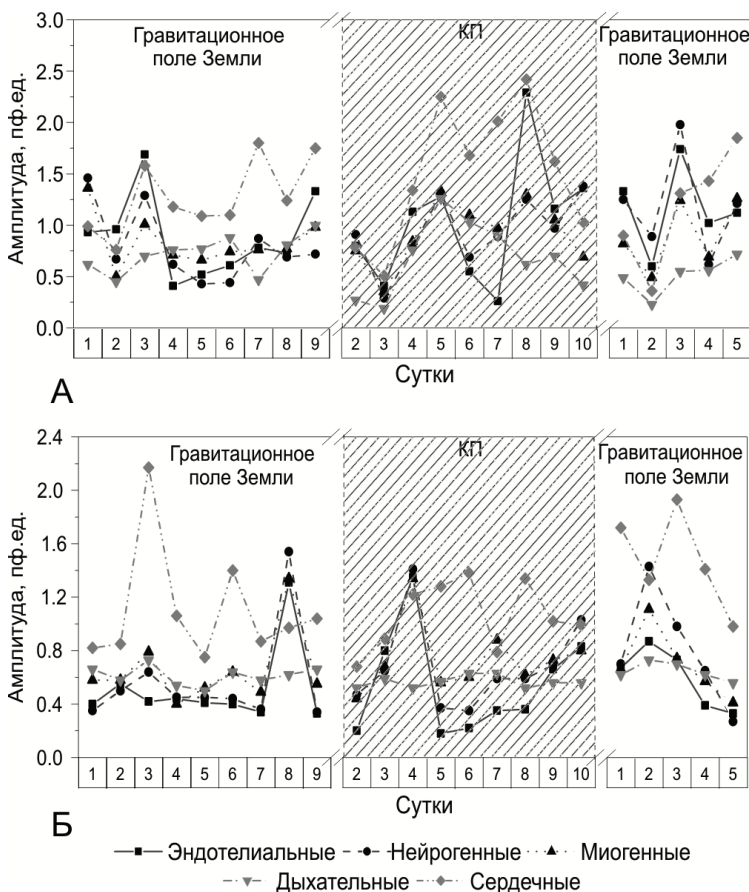


Рис. 5. Динамика амплитуд колебаний тканевой перфузии на протяжении всего КЭ «ЛАЗМА» для космонавта № 1. А – для I пальца стопы; Б – для III пальца руки

анализа для космонавта № 1 в области подошвенной поверхности дистальной фаланги I пальца стопы и ладонной поверхности дистальной фаланги III пальца руки представлены на рис. 5.

Согласно рис. 5, А, на 3-и сутки КП происходит одновременное снижение всех амплитуд колебаний тканевой перфузии, после чего амплитуды колебаний увеличиваются вплоть до 5 сут КП включительно. Снижение модуляции кровотока на фоне общего снижения тканевой перфузии может быть связано с уменьшением объема циркулирующей крови в нижних конечностях на фоне перераспределения крови в краниальном направлении в период острой адаптации к условиям микрогравитации. Последующее увеличение (4–5-е сутки КП) амплитуд колебаний свидетельствует о постепенной адаптации организма к новым условиям за счет увеличения активности модуляции кровотока на фоне артериального притока (доминирование амплитуд сердечных колебаний с 4-х по 9-е сутки КП). Амплитуды миогенных колебаний возрастают на 4–5-е сутки КП и остаются на высоком уровне по сравнению с 2–3-ми сутками КП, что характеризует

увеличение числа функционирующих капилляров и увеличение притока артериальной крови в нутритивное русло, компенсируя недостаток трофического обеспечения нижних конечностей в условиях невесомости.

Амплитуды колебаний тканевой перфузии в пальцах рук (см. рис. 5, Б) в меньшей степени подвержены изменениям во время КП, что может быть связано как с их гемодинамическим постоянством ввиду расположения в центральной плоскости тела, так и с высокой функциональной активностью во время КП, что нивелирует негативное влияние микрогравитации на организм космонавта. При этом на 4-е сутки КП наблюдали увеличение амплитуд колебаний до максимальных значений, что может быть следствием гемодинамической перестройки организма при адаптации к условиям микрогравитации.

Можно отметить некоторое расхождение полученных в настоящем исследовании данных с ранее зарегистрированными результатами оценки МЦК при «сухой» иммерсии. Так, например, некоторые авторы [10, 20] отмечают увеличение тканевой перфузии, увеличение амплитуд нейрогенных и миогенных колебаний микроциркуляторного кровотока. Возможными причинами выявленных изменений функционирования системы МЦК при «сухой» иммерсии могут являться как температурные условия, приводящие к нагреву исследуемой области, так и горизонтальное положение тела волонтеров при проведении исследования, а также краткосрочность моделирования эффектов невесомости (в основном 3–5 сут).

Выводы

1. Впервые в мире проведено исследование МЦК в различных регионах кожи (голова, палец руки, предплечье, палец стопы) в условиях реального КП с применением портативных лазерных флоуметров. Удалось зарегистрировать изменения в микроциркуляторном русле в различных участках кожи как у профессионального космонавта, так и у космического туриста, не имеющего предшествующего опыта полетов.
2. Наиболее значительные изменения параметров МЦК происходят в височной области головы и в области нижних конечностей на 2-е и 3-и сутки КП и характеризуются значимым снижением тканевой перфузии и повышением сосудистого тонуса с постепенным восстановлением предполетных значений к 6-м суткам КП.

3. Полученные в условиях микрогравитации результаты демонстрируют существенные функциональные различия кожной перфузии в пальцах верхних и нижних конечностей 2 космонавтов, что может быть обусловлено как уровнем профессиональной подготовки, так и применением средств компенсации. Применение средств нормализации перераспределения крови во время КП космическим туристом привело к увеличению вазомоторной активности тонус-формирующих механизмов регуляции кровотока как в нижних, так и в верхних конечностях.

4. Для более подробного изучения физиологических реакций при адаптации системы МЦК к условиям микрогравитации и уточнения влияния долгосрочных изменений на организм космонавтов требуется проведение дальнейших исследований МЦК и других параметров сердечно-сосудистой системы в реальных условиях КП.

Авторы выражают благодарность космонавтам Александру Мисуркину, Юсаку Маедзава и Йозо Хирано за участие в космическом эксперименте «ЛАЗМА», а также компании Space Adventures Ltd. (М. Губайдуллин, Д. Шапиро) и ПАО «РКК «Энергия» за помощь в организации эксперимента.

Список литературы

1. *Gazenko O.G., Shulzhenko E.B., Turchaninova V.F. et al.* Central and regional hemodynamics in space flights // *Acta Astronaut.* 1988. V. 17. № 2. P. 173–179.
2. *Фомина Г.А., Котовская А.Р., Темнова Е.В.* Динамика сердечно-сосудистых изменений в различные периоды длительного пребывания человека в невесомости // *Авиакосм. и экол. мед.* 2009. Т. 43. № 3. С. 11–16.
3. *Fomina G.A., Kotovskaya A.R., Temnova E.V.* Dynamics of the human cardiovascular responses in different periods of long-term exposure in weightlessness // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina.* 2009. V. 43. № 3. P. 11–16.
4. *Jirak P., Mirna M., Rezar R. et al.* How spaceflight challenges human cardiovascular health // *Eur. J. of Preventive Cardiol.* 2022. V. 29. № 10. P. 1399–1411.
5. *Baevsky R.M., Funtova I.I., Luchitskaya E.S. et al.* The effects of long-term microgravity on autonomic regulation of blood circulation in crewmembers of the International space station // *Cardiometry.* 2014. № 5. P. 35–39.
6. *Mohammadyari P., Gadda G., Taibi A.* Modelling physiology of haemodynamic adaptation in short-term microgravity exposure and orthostatic stress on Earth // *Scientific Rep.* 2021. V. 11. № 1. e4672.
7. *Gallo C., Ridolfi L., Scarsoglio S.* Cardiovascular deconditioning during long-term spaceflight through multiscale modeling // *Microgravity.* 2020. V. 6. № 1. P. 27.
8. *Navasiolava N.M., Custaud M.-A., Tomilovskaya E.S. et al.* Long-term dry immersion: review and prospects // *Eur. J. of Appl. Physiol.* 2011. V. 111. P. 1235–1260.
9. *Watenpaugh D.E.* Analogs of microgravity: head-down tilt and water immersion // *J. of Appl. Physiol.* 2016. V. 120. № 8. P. 904–914.
10. *Mekari S., Murphy R.J., MacKinnon A.R. et al.* The impact of a short-period head-down tilt on executive function in younger adults // *Scientific Rep.* 2022. V. 12. № 1. e20888.
11. *Пашкова Д.В., Попова Ю.А., Федорович А.А.* Функциональное состояние микроциркуляторного русла кожи здоровых женщин в условиях «сухой» иммерсии // *Авиакосм. и экол. мед.* 2023. Т. 57. № 2. С. 39–46.
12. *Pashkova D.V., Popova Yu.A., Fedorovich A.A.* Functional state of the skin microcirculation bed in healthy females in the condition of dry immersion // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina.* 2023. V. 57. № 2. P. 39–46.
13. *Ansari R.R., Manuel F.K., Suh K.I. et al.* Choroidal blood flow measurements in zero gravity (space-like) environment using laser-doppler flowmetry // *Investigative Ophthalmol. & Visual Sci.* 2003. V. 44. № 13. P. 960–960.
14. *Navasiolava N., Yuan M., Murphy R. et al.* Vascular and microvascular dysfunction induced by microgravity and its analogs in humans: mechanisms and countermeasures // *Front. in Physiol.* 2020. V. 11. P. 952.
15. *Lloret J., Arnaud L., Gauquelin G. et al.* Cardiospace French Chinese cooperation in gravitational physiology // *Front. in Physiol.* 2019. Conference Abstract: 39th ISGP Meeting & ESA Life Sciences Meeting.
16. *Крупаткин А.И., Сидоров В.В.* Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем: колебания, информация, нелинейность: Руководство для врачей. М., 2013.
17. *Krupatkin A.I., Sidorov V.V.* Functional diagnostics of the state of microcirculatory and tissue systems: fluctuations, information, nonlinearity: A guide for doctors. Moscow, 2013.
18. *Norsk P.* Blood pressure regulation IV: adaptive responses to weightlessness // *Eur. J. of Appl. Physiol.* 2014. V. 114. P. 481–497.
19. *Dunaev A.* Wearable devices for multimodal optical diagnostics of microcirculatory-tissue systems: application experience in the clinic and space // *J. of Biomed. Photonics & Engineering.* 2023. V. 9. № 2. P. 1–10.
20. *Kvandal P., Landsverk S.A., Bernjak A. et al.* Low frequency oscillations of the laser Doppler perfusion signal in human skin // *Microvasc. Res.* 2006. V. 72. № 3. P. 120–127.
21. *Крупаткин А.И.* Значение колебательных процессов в диагностике состояния микроциркуляторно-тканевых систем // *Физиология человека.* 2018. Т. 4. № 5. С. 103–114.
22. *Krupatkin A.I.* Oscillatory processes in the diagnosis of the state of microvascular-tissue systems // *Fiziologiya cheloveka.* 2018. V. 44. № 5. P. 581–591.
23. *Богомолов В.В., Гончаров И.Б., Богатова Р.И. и др.* Медицинское обеспечение космонавтов-непрофессионалов, совершивших кратковременные космические полеты на Международной космической станции // *Авиакосм. и экол. мед.* 2008. Т. 42. № 1. С. 15–19.
24. *Bogomolov V.V., Goncharov I.B., Bogatova R.I. et al.* Medical provisions for non-career cosmonauts on

short-duration flights to the International Space Station // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*. 2008. V. 42. № 1. P. 15–19.

20. Памова А.П. Микроциркуляторное звено сердечно-сосудистой системы человека при моделировании воздействия факторов космического полета: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. М., 2019.

Pamova A.P. Microcirculatory link of the human cardiovascular system in modeling the effects of space flight factors: Avtoreferat dissertatsii ... kandidata meditsinskikh nauk. Moscow, 2019.

Поступила 04.05.2023

INVESTIGATION OF BLOOD MICROCIRCULATION IN MICROGRAVITY WITH THE USE OF PORTABLE LASER DOPPLER FLOWMETERS

**Dunaev A.V.¹, Loktionova Yu.I.¹, Zharkikh E.V.¹,
Fedorovich A.A.^{2,3}, Sidorov V.V.⁴, Vasin A.V.⁵,
Dubinin V.I.⁵**

¹Orel State University

²National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow

³Russian Federation State Research Center – Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow

⁴SPE "LAZMA" Ltd, Moscow

⁵Yu.A. Gagarin Research and Test Cosmonaut Training Center, Zvyozdny gorodok, Moscow region

The paper reports the results of blood microcirculation studies in microgravity using portable laser analyzer LAZMA PF.

Two cosmonauts (C-1 and C-2) performed pre-launch and in-flight (9 days) 8-minute sessions with the use of 2 portable flowmeters symmetrically attached to the temporal skin, palmer sides of distal phalanxes III, forearm superficies and planter surfaces of toe distal phalanxes I.

In C-1, mean perfusion rate in toes decreased more than in half due to blood redistribution toward the upper body on the first two days in orbit and then, by way of adaptation, regained normal mean values. In C-2, compression of the proximal regions of lower extremities to induce blood deposition caused high-amplitude NO-dependent oscillations at about 1/min. On the background of adaptation during flight days 2–3, high-amplitude endothelial vasomotions in C-1 (one oscillation every 3–4 minutes) can be associated with an endothelial hyperpolarizing factor. In whole, on flight days 2–3 adaptation of the microcirculation system, particularly pronounced in the temporal and planter tissues, was characterized by a significant reduction of perfusion and increased vascular tone. Baseline prelaunch values were regained by flight day 6.

For the first time, a research technique was proposed under microgravity conditions and data were obtained on the state of blood microcirculation of astronauts during the period of acute adaptation to microgravity conditions and readaptation after flight completion.

Key words: space flight, blood microcirculation, tissue perfusion, laser Doppler flowmetry, portable devices, microgravity.

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2024. V. 58. № 1. P. 47–54.