

УДК 612.084:[612.766.1:523.34]

## КАРДИОРЕСПИРАТОРНЫЕ РЕАКЦИИ ЧЕЛОВЕКА ВО ВРЕМЯ СУБМАКСИМАЛЬНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ПОСЛЕ 14-СУТОЧНОГО ПРЕБЫВАНИЯ В УСЛОВИЯХ МОДЕЛИРОВАННОЙ ЛУННОЙ ГРАВИТАЦИИ

© 2023 г. А. А. Пучкова<sup>1</sup>, \*, А. В. Шпаков<sup>1, 2</sup>, В. П. Катунцев<sup>1</sup>,  
Д. М. Ставровская<sup>1</sup>, Г. К. Примаченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН ГНЦ РФ – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>ФГБУ “Федеральный научный центр физической культуры и спорта”, Москва, Россия

\*E-mail: alina.a.puchkova@gmail.com

Поступила в редакцию 10.07.2023 г.

После доработки 07.08.2023 г.

Принята к публикации 11.08.2023 г.

В данной работе представлены основные результаты проведенного исследования по изучению влияния моделирования физиологических эффектов лунной гравитации на кардиореспираторные реакции человека во время выполнения физической нагрузки. В эксперименте приняли участие 12 практически здоровых мужчин-добровольцев в возрасте от 19 до 31 года ( $M \pm SD$ :  $22.5 \pm 4.0$  лет), которые в течение 14 сут находились в условиях ортостатической гипокинезии (ОГ) с углом наклона тела  $+9.6^\circ$  относительно горизонта как модели физиологических эффектов лунной гравитации. Кардиопульмональное нагрузочное тестирование (КПНТ) выполняли за 7 сут до начала ОГ и на следующие сутки после окончания экспериментального воздействия. В качестве протокола физической нагрузки использовали 3-ступенчатый велоэргометрический тест с 5-минутными площадками мощностью 125, 150 и 175 Вт. Пребывание в условиях моделирования физиологических эффектов лунной гравитации снижало толерантность организма человека к выполнению физической работы. На это указывали более выраженные реакции со стороны таких показателей кардиореспираторной системы, как частота сердечных сокращений, минутная вентиляция легких, дыхательные эквиваленты по кислороду и углекислому газу, а также менее выраженный прирост потребления кислорода и кислородного пульса во время выполнения КПНТ после 14 суток воздействия ОГ.

**Ключевые слова:** кардиореспираторная система, физическая работоспособность, кардиопульмональное нагрузочное тестирование, ортостатическая гипокинезия, лунная гравитация.

**DOI:** 10.31857/S0131164623600350, **EDN:** DFRFXU

Активное развитие и подготовка программ пилотируемой космонавтики, предполагающих полеты за пределы околоземной орбиты к Луне, требует проведения большого объема опережающих исследований, направленных на изучение физиологических реакций организма человека в условиях лунной гравитации, пониженной в 6 раз относительно земной.

Объем имеющихся на данный момент исследований, посвященных изучению влияния пониженного уровня гравитации (гипогравитации), в частности лунной гравитации, довольно мал. Основным источником информации о непосредственном влиянии гравитации Луны на организм человека являются данные космической программы NASA “Аполлон” – единственной на данный момент реализованной программы пилотируемых полетов к Луне с высадкой членов экипа-

жа на ее поверхность. Общая продолжительность пилотируемых полетов по данной программе составила 8.1–12.6 сут, а пребывание и работа астронавтов на лунной поверхности 22.2–75 ч [1]. Данные полеты с относительно короткими сроками последовательного воздействия на организм человека микрогравитации и лунной гравитации приводили в послеполетном периоде к снижению переносимости астронавтами физических нагрузок и ряду других функциональных изменений [2].

За последние десятилетия появился ряд работ, направленных на изучение физиологических реакций человека в условиях моделирования гипогравитации [3]. Часть данных работ, в том числе, посвящена реакциям кардиореспираторной системы при физической нагрузке с использованием различных моделей физиологических эффектов

гипогравиации: как математического моделирования [4], так и применения положительного давления на нижнюю часть тела (*lower body positive pressure, LBPP*) при выполнении ходьбы и бега на беговой дорожке [5], выполнения нагрузки на велоэргометре в ортостатическом положении [6], использования системы подвесов на вертикальной беговой дорожке [7] и др. Однако все представленные на данный момент в литературе работы описывают результаты экспериментальных исследований по изучению физиологических реакций при выполнении физической нагрузки в условиях краткосрочного воздействия на организм человека пониженного уровня гравитации. Физиологические эффекты, связанные с продолжительным пребыванием человека в условиях лунной гравитации, в настоящее время остаются пока еще не раскрытыми [3].

Целью работы являлось изучение влияния 14-суточного пребывания в условиях ортостатической гипокинезии (ОГ) как модели физиологических эффектов лунной гравитации [8] на кардиореспираторные реакции человека во время выполнения физической нагрузки.

## МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 12 практически здоровых мужчин-добровольцев в возрасте от 19 до 31 года ( $M \pm SD$ :  $22.5 \pm 4$  лет), массой тела от 63 до 84 кг ( $76.8 \pm 6.5$  кг), длиной тела от 173 до 193 см ( $182.3 \pm 6$  см). Все добровольцы успешно прошли медицинское освидетельствование, были ознакомлены с программой исследования.

Испытатели в течение 14 сут находились в условиях моделирования физиологических эффектов лунной гравитации. В качестве модели использовали метод ОГ, предполагающий расположение тела обследуемого человека под положительным углом наклона головного конца кровати, равным  $+9.6^\circ$  по отношению к горизонту, на время дневной работы с 07:00 до 23:00 (16 ч) с переводом в горизонтальное положение на время ночного сна с 23.00 до 07.00 (8 ч) [8].

Кардиопульмональное нагрузочное тестирование (КПНТ) выполняли за 7 сут до начала ОГ (*Baseline Data Collection, BDC-7*) и на следующие сутки после окончания экспериментального воздействия (*Recovery, R + 1*). Исследования проводили в одни и те же вечерние часы (17:00–18:00) в хорошо вентилируемом помещении при поддержании температуры окружающего воздуха  $21-22^\circ\text{C}$ .

В качестве протокола физической нагрузки использовали 3-ступенчатый велоэргометрический тест с 5-минутными площадками, мощность выполняемой нагрузки ( $WR$ ) которых составляла 125, 150 и 175 Вт. Испытатели выполняли тесто-

вый протокол на велоэргометре *Ergoselect 200 (Ergoline, Германия)*. Запись параметров кардиореспираторной системы проводили в состоянии покоя непосредственно перед нагрузкой в течение 5 мин (покой), на каждой минуте нагрузки и в течение первых 5 мин восстановительного периода при помощи эргоспирометрической системы *MetaLyzer 3B (CORTEX Biophysik, Германия)*.

Непрерывно оценивали следующие показатели работы сердечно-сосудистой и дыхательной систем: частота сердечных сокращений (ЧСС, уд./мин), частота дыхания (ЧД,  $\text{мин}^{-1}$ ), величина дыхательного объема (ДО, л), минутная вентиляция легких ( $V_E$ , л/мин), потребление кислорода ( $VO_2$ , мл/мин), выделение углекислого газа ( $VCO_2$ , мл/мин), дыхательный эквивалент по кислороду ( $V_E/VO_2$ ), дыхательный эквивалент по углекислому газу ( $V_E/VCO_2$ ), дыхательный коэффициент (ДК) и кислородный пульс ( $VO_2/\text{ЧСС}$ , мл/уд.). Для анализа значения показателей усредняли за 10 с. Измерения артериального давления (АД, мм рт. ст.), проводили на 2-й и 5-й мин периода покоя перед нагрузкой, на 5-й мин каждой ступени нагрузки и на 1-й и 5-й мин восстановительного периода с использованием автоматического монитора АД, подключенного к велоэргометру.

Показаниями для преждевременного прекращения КПНТ являлись: выраженный подъем АД ( $230/120$  мм рт. ст.), снижение САД  $\geq 10$  мм рт. ст. при увеличении мощности нагрузки, достижение возрастной максимальной ЧСС, появление отрицательной динамики ЭКГ, возникновение головокружения, тошноты или других признаков непереносимости физической нагрузки, жалобы испытуемого на выраженную мышечную усталость или его отказ от дальнейшего проведения пробы, невозможность испытуемого поддерживать заданную частоту педалирования ( $55-60$  об./мин).

Результаты проведенных исследований были обработаны статистически с применением программного пакета *Statistica 12*. Для статистического анализа использовали непараметрический  $T$ -критерий Уилкоксона для зависимых выборок. Различия считали статистически значимыми при  $p < 0.05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

До и после ОГ полностью выполнили тестовый протокол на велоэргометре 10 испытуемых из 12: КПНТ испытуемых № 8 и 9 было прекращено по причине появления симптомов выраженной мышечной усталости и невозможности поддерживать заданную частоту педалирования как до, так и после ОГ. Время педалирования при выполнении КПНТ испытуемым № 8 составило 11 мин 3 с и 10 мин 39 с до и после экспериментального воздействия соответственно. У испыту-

**Таблица 1.** Значения максимальной достигнутой частоты сердечных сокращений ( $ЧСС_{\max}$ ) и показателей, характеризующих скорость увеличения ЧСС при максимальной нагрузке ( $ЧСС_{\max}/ЧСС_{\text{п}}$ ) и скорость снижения ЧСС к 5-й мин восстановления относительно уровня покоя ( $ЧСС_{\text{п}}/ЧСС_{\text{п}}$ ) у испытуемых при выполнении КПНТ до ( $BDC-7$ ) и после ( $R+1$ ) пребывания в условиях 14-суточной ОГ

№ исп.	$ЧСС_{\max}$ , уд./мин			$ЧСС_{\max}/ЧСС_{\text{п}}$ , %			$ЧСС_{\text{п}}/ЧСС_{\text{п}}$ , %		
	$BDC-7$	$R+1$		$BDC-7$	$R+1$		$BDC-7$	$R+1$	
1	165	179	↑	162.4	162.6	↑	114.5	121.0	↑
2	162	180	↑	168.3	166.9	↓	110.1	119.0	↑
3	151	175	↑	180.5	182.0	↑	119.5	124.8	↑
4	194	200	↑	189.9	198.8	↑	123.5	131.9	↑
5	164	177	↑	227.2	185.0	↓	130.1	115.8	↓
6	162	169	↑	203.2	171.3	↓	135.6	112.7	↓
7	171	168	↓	208.7	210.8	↑	140.6	146.2	↑
8	166 <sup>#</sup>	180 <sup>#</sup>	↑ <sup>#</sup>	166.2 <sup>#</sup>	184.0 <sup>#</sup>	↑ <sup>#</sup>	115.1 <sup>#</sup>	114.4 <sup>#</sup>	↓ <sup>#</sup>
9	198 <sup>#</sup>	189 <sup>#</sup>	↓ <sup>#</sup>	191.5 <sup>#</sup>	221.2 <sup>#</sup>	↑ <sup>#</sup>	130.6 <sup>#</sup>	119.4 <sup>#</sup>	↓ <sup>#</sup>
10	167	190	↑	236.3	219.7	↓	145.4	147.4	↑
11	168	173	↑	203.9	190.3	↓	124.6	120.9	↓
12	165	174	↑	191.5	227.9	↑	126.3	152.4	↑
$M \pm SD$	$169.4 \pm 13.4$	$179.5 \pm 9.4^*$	↑ <sup>*</sup>	$194.1 \pm 23.2$	$193.4 \pm 22.2$	—	$126.3 \pm 10.8$	$127.2 \pm 14.0$	—

*Примечание:* ОГ — ортостатическая гипокинезия. \* — достоверные отличия по сравнению с  $BDC-7$ ,  $p < 0.05$ ; # — данные получены у испытуемых, выполнивших тестовый протокол не в полном объеме (педальное было досрочно остановлено по показаниям); стрелками указано направление изменений относительно фоновых значений: ↑ — увеличение значений показателя, ↓ — снижение значений показателя.

емого № 9 педальное было прекращено через 7 мин до ОГ и через 6 мин 6 с на  $R+1$  сутки после ОГ.

В табл. 1 представлены индивидуальные показатели максимальной достигнутой ЧСС ( $ЧСС_{\max}$ ) и полученные расчетным путем показатели, характеризующие скорость увеличения ЧСС при максимальной нагрузке относительно уровня покоя ( $ЧСС_{\max}/ЧСС_{\text{п}}$ , %) и скорость снижения ЧСС к 5-й мин восстановления относительно уровня покоя ( $ЧСС_{\text{п}}/ЧСС_{\text{п}}$ , %).

В связи с тем, что двое испытуемых выполнили КПНТ не в полном объеме, их данные в дальнейшем анализе не учитывались.

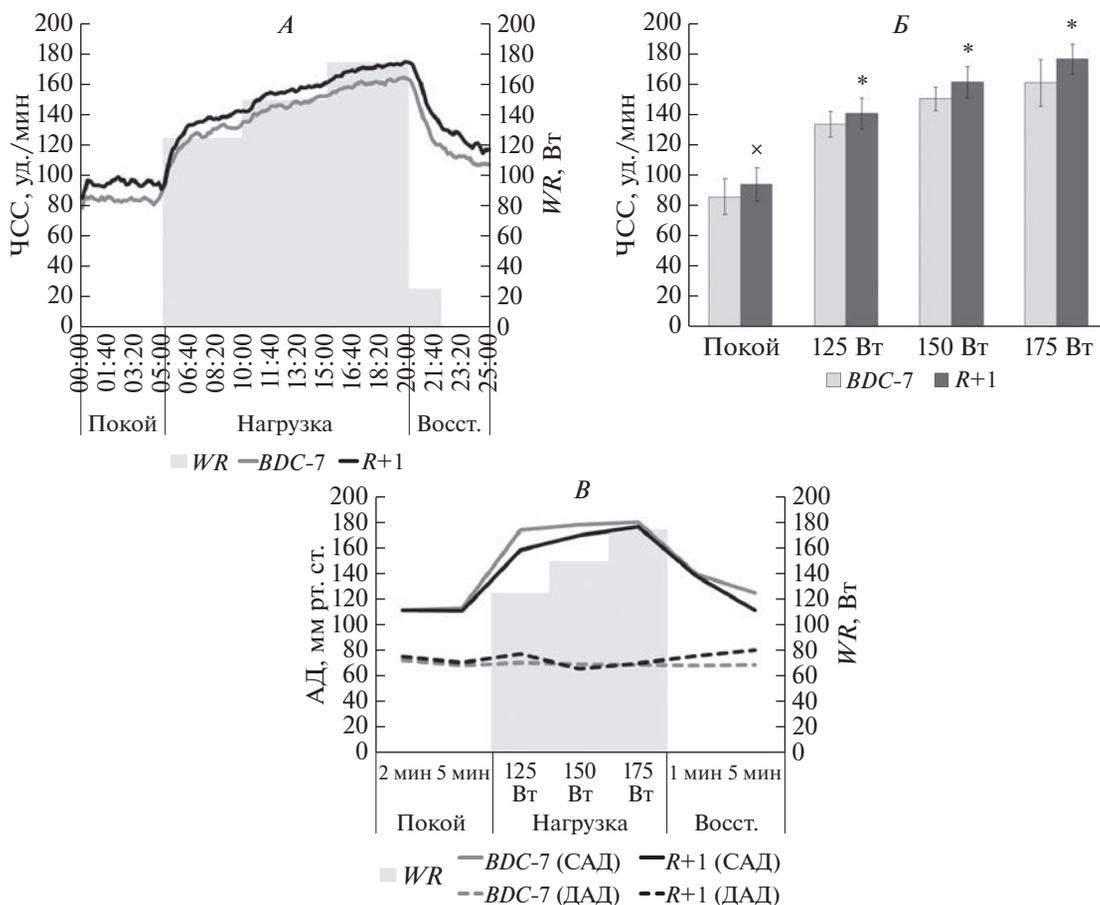
Наряду с увеличением значений  $ЧСС_{\max}$ , ЧСС испытуемых в ходе КПНТ на  $R+1$  сутки после ОГ была выше в среднем на 8–11 уд./мин (~8–9%), чем до гипокинезии (рис. 1, А). Для статистического анализа результатов тестирования были получены средние значения ( $M \pm SD$ ) показателя за последние 2 мин (4-я и 5-я мин) периода покоя до нагрузки и всех ступеней нагрузки: 125, 150 и 175 Вт. Выявленные изменения ЧСС достигли

уровня статистической значимости на всех трех ступенях нагрузки (рис. 1, Б).

Также отмечалась тенденция ( $p < 0.1$ ) к учащению ЧСС в среднем на 8 уд./мин в периоде покоя до нагрузки после экспериментального воздействия по сравнению с фоновыми исследованиями. В связи с этим, несмотря на то, что у большинства испытуемых достигнутые значения  $ЧСС_{\max}$  после ОГ были выше, чем до экспериментального воздействия, динамика  $ЧСС_{\max}/ЧСС_{\text{п}}$  и  $ЧСС_{\text{п}}/ЧСС_{\text{п}}$  носила индивидуальный характер (табл. 1). Таким образом, значимых изменений в скорости увеличения ЧСС во время нагрузки и скорости ее восстановления обнаружено не было.

В динамике АД, включая показатели систолического и диастолического давления, во время КПНТ после ОГ по сравнению с данными до экспериментального воздействия значимых изменений обнаружено не было (рис. 1, В).

При исследовании изменений показателя  $V_E$  наблюдали тенденцию к более выраженному увеличению показателя при выполнении испытуемыми КПНТ после 14 сут ОГ (рис. 2, А). Увеличе-



**Рис. 1.** Значения частоты сердечных сокращений (ЧСС) и артериального давления (АД) испытуемых при выполнении кардиопульмонального нагрузочного тестирования (КПНТ) до (*BDC-7*) и после (*R + 1*) 14-суточной ортостатической гипокинезии.

*A* – средние значения (*Me*) ЧСС испытуемых в ходе КПНТ; *B* – средние значения ( $M \pm SD$ ) ЧСС за последние 2 мин (4-я и 5-я мин) каждого из этапов КПНТ: периода покоя до нагрузки и всех ступеней нагрузки: 125, 150 и 175 Вт; *B* – средние значения (*Me*) систолического (САД) и диастолического АД (ДАД) испытуемых в ходе КПНТ. \* – достоверные отличия по сравнению с *BDC-7*,  $p < 0.05$ ; × – различия по сравнению с *BDC-7* достигли уровня статистической тенденции,  $p < 0.1$ ; *WR* – мощность выполняемой нагрузки.

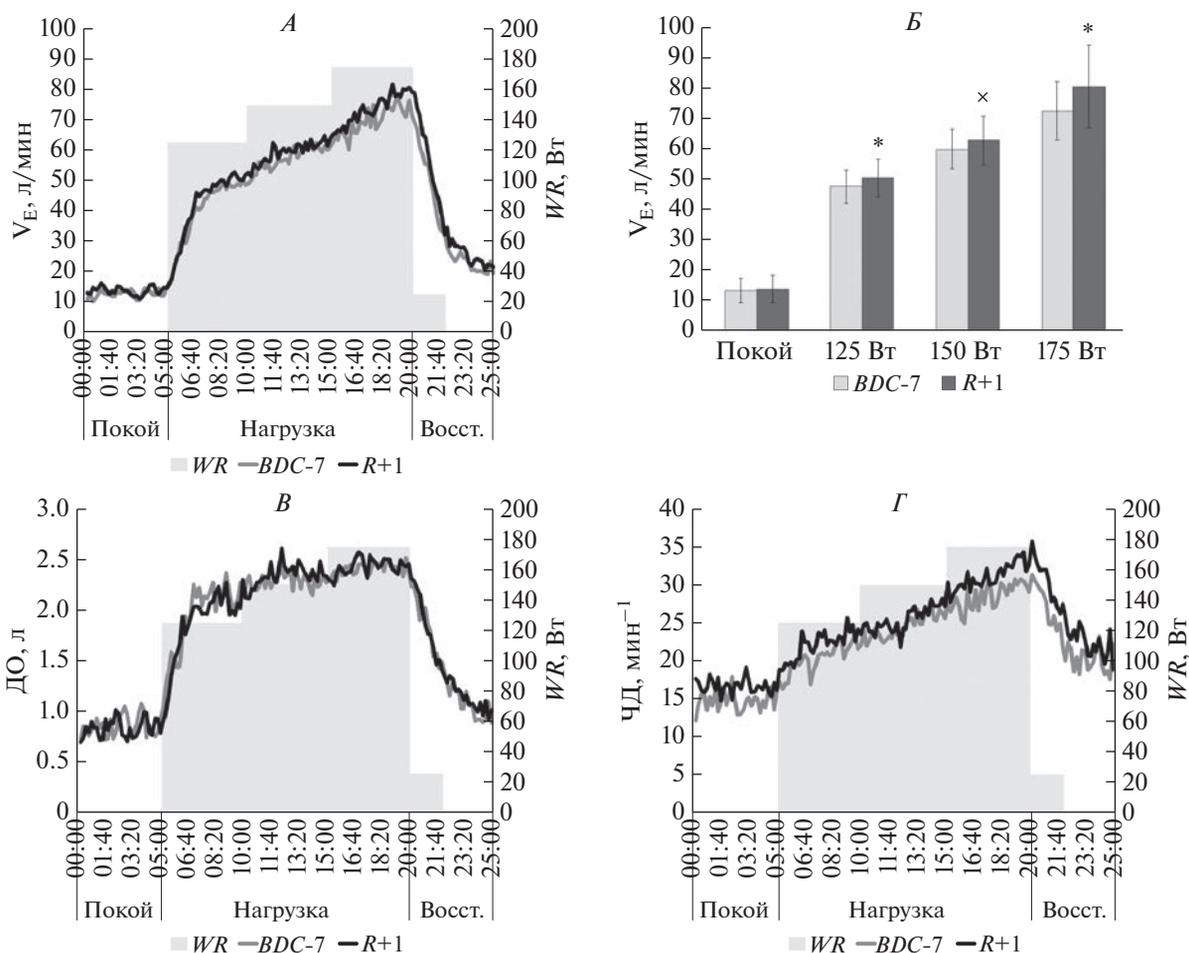
ние вентиляции происходило преимущественно за счет увеличения ЧД (рис. 2, *Г*), значимых изменений со стороны показателей дыхательного объема отмечено не было (рис. 2, *В*). Данные изменения особенно отмечали на высокой нагрузке, т.е. на 3-й ступени тестирования мощностью 175 Вт: прирост  $V_E$  и ЧД составил около ~9–11% от уровня фонового тестирования.

В динамике потребления кислорода отмечали обратные изменения: наблюдали менее выраженный прирост  $VO_2$  во время педалирования при выполнении испытуемыми КПНТ после воздействия 14-суточной моделированной лунной гравитации (рис. 3, *A* и *Б*). Однако в динамике  $VCO_2$  и ДК значимых изменений обнаружено не было.

Также отмечался значимо ( $p < 0.05$ ) меньший прирост во время КПНТ после ОГ такого показателя, как кислородный пульс, который рассмат-

ривается как показатель экономичности и эффективности системы снабжения организма кислородом (рис. 3, *В* и *Г*). Изменения  $VO_2/ЧСС$  во время педалирования составили ~7–9% от уровня нагрузки до ОГ. По завершении педалирования, к 5-й мин восстановительного периода, значения показателей  $VO_2/ЧСС$  и  $VO_2$  восстановились до уровня значений, полученных в периоде покоя до нагрузки как до, так и после ОГ.

Об эффективности легочной вентиляции позволяют судить такие показатели, как дыхательные эквиваленты по кислороду ( $V_E/VO_2$ ) и углекислому газу ( $V_E/VCO_2$ ), отражающие объем  $V_E$ , необходимый для вдыхания 1 л  $O_2$  или выдыхания 1 л  $CO_2$  соответственно. Абсолютные значения  $V_E/VO_2$  и  $V_E/VCO_2$  при выполнении нагрузочного тестирования были выше после экспериментального воздействия, чем до него (рис. 4). Данная ди-



**Рис. 2.** Значения минутной вентиляции легких ( $V_E$ ), дыхательного объема ( $DO$ ) и частоты дыхания ( $CD$ ) испытуемых при выполнении кардиопульмонального нагрузочного тестирования (КПНТ) до ( $BDC-7$ ) и после ( $R+1$ ) 14-суточной ортостатической гипокинезии.

$A$  – средние значения ( $Me$ )  $V_E$  испытуемых в ходе КПНТ;  $B$  – средние значения ( $M \pm SD$ )  $V_E$  за последние 2 мин (4-я и 5-я мин) каждого из этапов КПНТ: периода покоя до нагрузки и всех ступеней нагрузки: 125, 150 и 175 Вт;  $B$  – средние значения ( $Me$ )  $DO$  испытуемых в ходе КПНТ;  $Г$  – средние значения ( $Me$ )  $CD$  испытуемых в ходе КПНТ. \* – достоверные отличия по сравнению с  $BDC-7$ ,  $p < 0.05$ ; × – различия по сравнению с  $BDC-7$  достигли уровня статистической тенденции,  $p < 0.1$ ;  $WR$  – мощность выполняемой нагрузки.

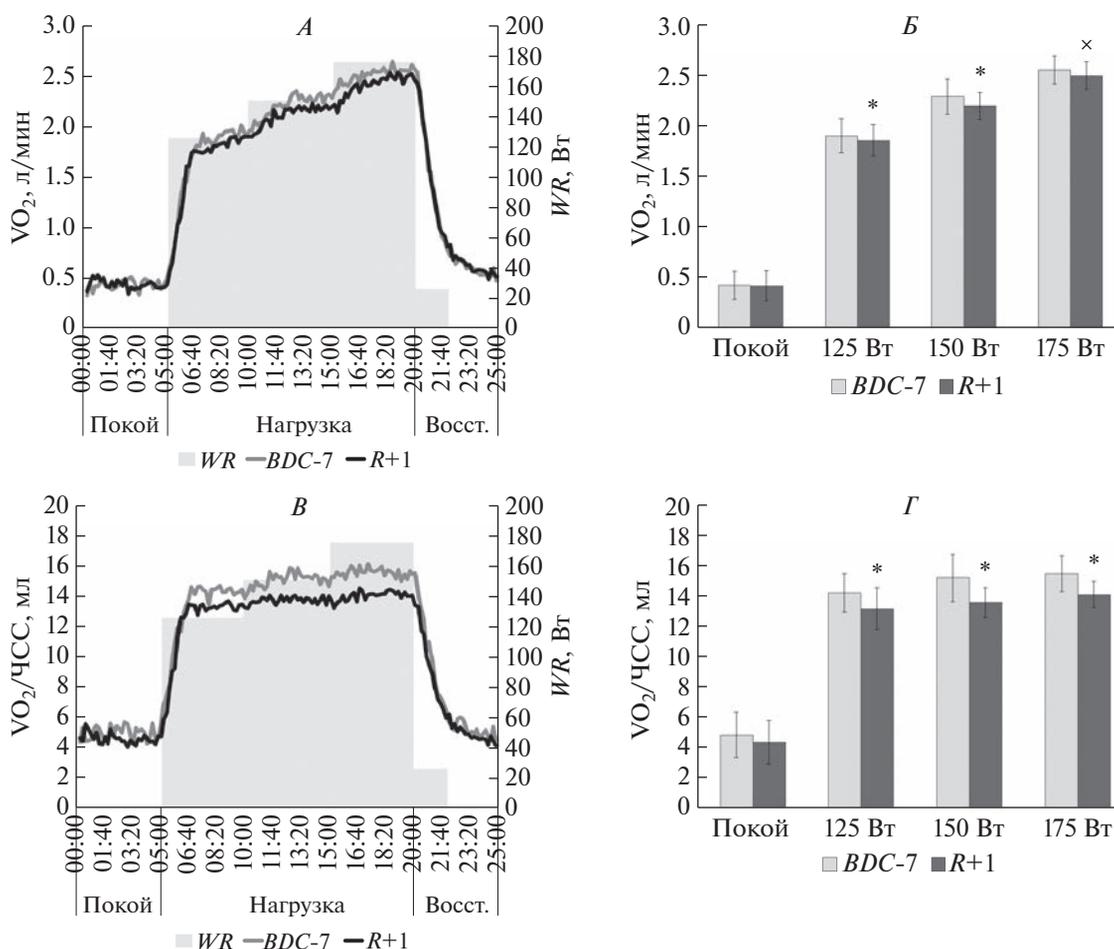
намика свидетельствует о снижении эффективности вентиляции у испытуемых при выполнении КПНТ после пребывания в условиях 14-суточной ОГ.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как видно из полученных данных, в настоящем исследовании после воздействия 14-суточной ОГ наблюдалось достоверно большее ( $p < 0.05$ ) увеличение ЧСС, показателей  $V_E$ ,  $CD$ ,  $V_E/VO_2$  и  $V_E/VCO_2$ , а также менее выраженный прирост  $VO_2$  и  $VO_2/ЧСС$  во время КПНТ. Следовательно, результаты проведенных исследований свидетельствуют о более напряженной работе кардиореспираторной системы во время выполнения нагрузочного тестирования, что указывает на

снижение показателей физической работоспособности человека после пребывания в условиях моделирования физиологических эффектов лунной гравитации в течение 14 сут. Это также подтверждается сокращением времени педалирования при выполнении КПНТ у испытуемых № 8 и 9.

В ряде ранее проведенных исследований [3, 5, 6, 9] установлено, что условия моделирования гипогравитации приводят к однонаправленным физиологическим реакциям, наблюдаемым в условиях микрогравитации и при ее моделировании. В условиях моделирования лунной гравитации, как и в условиях микрогравитации, также наблюдается изменение величины гравитационной составляющей гидростатического давления, перераспределение жидкостных сред организма в кра-



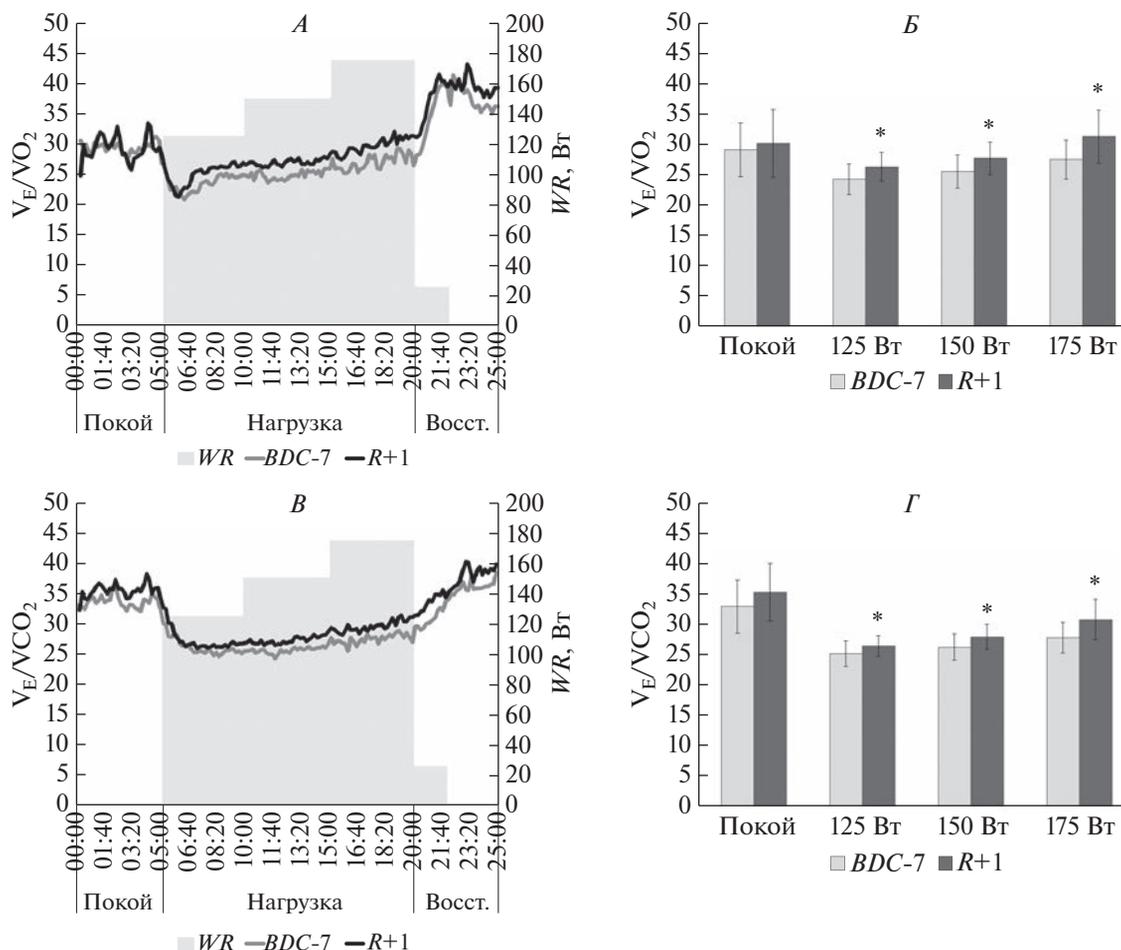
**Рис. 3.** Значения потребления кислорода ( $VO_2$ ) и кислородного пульса ( $VO_2/ЧСС$ ) испытуемых при выполнении кардиопульмонального нагрузочного тестирования (КПНТ) до ( $BDC-7$ ) и после ( $R+1$ ) 14-суточной ортостатической гипокинезии.

*A* – средние значения ( $Me$ )  $VO_2$  испытуемых в ходе КПНТ; *B* – средние значения ( $M \pm SD$ )  $VO_2$  за последние 2 мин (4-я и 5-я мин) каждого из этапов КПНТ: периода покоя до нагрузки и всех ступеней нагрузки: 125, 150 и 175 Вт; *B* – средние значения ( $Me$ )  $VO_2/ЧСС$  испытуемых в ходе КПНТ; *Г* – средние значения ( $M \pm SD$ )  $VO_2/ЧСС$  за последние 2 мин (4-я и 5-я мин) каждого из этапов КПНТ: периода покоя до нагрузки и всех ступеней нагрузки: 125, 150 и 175 Вт. \* – достоверные отличия по сравнению с  $BDC-7$ ,  $p < 0.05$ ; × – различия по сравнению с  $BDC-7$  достигли уровня статистической тенденции,  $p < 0.1$ ;  $WR$  – мощность выполняемой нагрузки.

ниальном направлении, приводящее в острый период к увеличению ударного объема сердца с последующим его снижением вследствие снижения объема циркулирующей плазмы [10], смещение положения диафрагмы и органов брюшной полости в краниальном направлении, изменение легочных объемов и перфузии в легких [11] и т.д. В дальнейшем, наряду с уменьшением физической активности, данные физиологические адаптивные реакции приводят к изменению параметров функционирования кардиореспираторной [12] и опорно-двигательной систем [13], и, вследствие этого, к изменению переносимости организмом человека физических нагрузок.

Так, полученные нами данные о снижении работоспособности после воздействия ОГ хорошо

согласуются с результатами других авторов при использовании моделей физиологических эффектов микрогравитации – антиортостатической гипокинезии (АНОГ) и “сухой” иммерсии [14, 15], а также данными космических полетов [16–18]. В работе *C. Capelli et al.* [19] у испытуемых после пребывания в условиях 14-суточной АНОГ наблюдалось увеличение значений ЧСС во время нагрузочного тестирования (в покое до нагрузки и во время самой нагрузки) на  $R+1$  сутки после АНОГ в среднем на 18% по сравнению с данными до экспериментального воздействия. В настоящем исследовании такие изменения составили ~8–9%. Принимая во внимание то, что протокол нагрузки упомянутого исследования отличался от используемого нами, сравнивать численные изменения показателей во время выполнения на-



**Рис. 4.** Значения дыхательных эквивалентов по кислороду ( $V_E/VO_2$ ) и углекислому газу ( $V_E/VCO_2$ ) испытуемых при выполнении кардиопульмонального нагрузочного тестирования (КПНТ) до (*BDC-7*) и после (*R + 1*) 14-суточной ортостатической гипокинезии.

*A* – средние значения (*Me*)  $V_E/VO_2$  испытуемых в ходе КПНТ; *B* – средние значения ( $M \pm SD$ )  $V_E/VO_2$  за последние 2 мин (4-я и 5-я мин) каждого из этапов КПНТ: периода покоя до нагрузки и всех ступеней нагрузки: 125, 150 и 175 Вт; *B* – средние значения (*Me*)  $V_E/VCO_2$  испытуемых в ходе КПНТ; *Г* – средние значения ( $M \pm SD$ )  $V_E/VCO_2$  за последние 2 мин (4-я и 5-я мин) каждого из этапов КПНТ: периода покоя до нагрузки и всех ступеней нагрузки: 125, 150 и 175 Вт. \* – достоверные отличия по сравнению с *BDC-7*,  $p < 0.05$ ; x – различия по сравнению с *BDC-7* достигли уровня статистической тенденции,  $p < 0.1$ ; *WR* – мощность выполняемой нагрузки.

грузочного тестирования нецелесообразно, можно говорить только об однонаправленности изменений.

Однонаправленные изменения наблюдались и в динамике  $VO_2$ : отмечалось снижение потребления кислорода, в частности  $VO_{2max}$ , во время выполнения физической нагрузки после пребывания человека в условиях реальной и моделированной микрогравитации [14, 17]. Прежде всего, данные изменения связывают со снижением объема циркулирующей крови и сердечного выброса [20]. Но постепенно все большую роль в механизмах снижения  $VO_{2max}$  отдают микроциркуляторным и метаболическим изменениям в мышцах [21], что, вполне вероятно, может наблюдаться и в условиях моделирования гипогравитации

в связи со схожестью механизмов адаптивных реакций физиологических систем организма человека.

Однако учитывая, что у человека, находящегося на поверхности Луны, сохраняется небольшая опорная нагрузка, так как гравитация Луны составляет  $1/6G$ , развивающиеся адаптивные реакции и их физиологические эффекты со стороны сенсомоторной [22] и кардиореспираторной систем, наблюдаемые в условиях микрогравитации, должны проявляться в меньшей степени. Так, в ходе различных исследований уже была показана зависимость физиологических реакций сердечно-сосудистой системы, а также ее нервной регуляции от величины гравитационной разгрузки: физиологические реакции в условиях моделиро-

вания микрогравитации ( $0G$ ) были выражены в большей степени, чем в условиях моделирования гипогравитации ( $0 < G < 1$ ) [23–27].

Таким образом, присутствующая на лунной поверхности частичная гравитация теоретически должна обеспечивать определенную защиту от адаптивных физиологических последствий микрогравитации, хотя в практическом отношении эффективность этой защиты в настоящее время остается неопределенной [28].

## ВЫВОДЫ

1. Во время выполнения КПНТ после завершения воздействия 14-суточной ОГ наблюдалось достоверно большее ( $p < 0.05$ ) увеличение ЧСС, минутной вентиляции легких, частоты дыхания, дыхательных эквивалентов по кислороду и углекислому газу, а также менее выраженный прирост потребления кислорода и кислородного пульса по сравнению с контрольными данными, что свидетельствует о более высокой напряженности функционирования кардиореспираторной системы.

2. Отмеченная в настоящем исследовании более высокая напряженность функционирования кардиореспираторной системы при выполнении КПНТ указывает на снижение толерантности организма человека к физической нагрузке после 14-суточной ОГ как физиологической модели условий лунной гравитации.

**Этические нормы.** Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены Комиссией по биомедицинской этике Федерального научно-клинического центра специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий ФМБА России (Москва) (протокол № 2 от 16.04.2019 г.).

**Информированное согласие.** Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

**Финансирование работы.** Работа выполнена в рамках темы РАН № 63.1.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

**Вклад авторов в публикацию.** Все авторы внесли равный вклад в выполнение данной работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Johnston R.S., Hull W.E. Apollo missions / Biomedical results of Apollo // Eds. Johnston R.S., Dietlein L.F., Berry Ch.A. Washington, D.C. NASA, 1975. P. 9.
2. Rummel J.A., Sawin C.F., Michel E.L. Exercise response / Biomedical Results of Apollo // Eds. Johnston RS, Dietlein L.F., Berry C.A. Washington, D.C. NASA, 1975. P. 265.
3. Richter C., Braunstein B., Winnard A. et al. Human Biomechanical and Cardiopulmonary Responses to Partial Gravity – A Systematic Review // Front. Physiol. 2017. V. 8. P. 583.
4. Bonjour J., Bringard A., Antonutto G. et al. Effects of acceleration in the Gz axis on human cardiopulmonary responses to exercise // Eur. J. Appl. Physiol. 2011. V. 111. № 12. P. 2907.
5. Schlabs T., Rosales-Velderrain A., Ruckstuhl H. et al. Comparison of cardiovascular and biomechanical parameters of supine lower body negative pressure and upright lower body positive pressure to simulate activity in 1/6 G and 3/8 G // J. Appl. Physiol. 2013. V. 115. № 2. P. 275.
6. Diaz-Artiles A., Navarro Tichell P., Perez F. Cardiopulmonary responses to sub-maximal ergometer exercise in a hypo-gravity analog using head-down tilt and head-up tilt // Front. Physiol. 2019. V. 10. P. 720.
7. Yilmaz K., Burnley M., Böcker J. et al. Influence of simulated hypogravity on oxygen uptake during treadmill running // Physiol. Rep. 2021. V. 9. № 9. P. e14787.
8. Баранов М.В., Катунцев В.П., Шпаков А.В., Баранов В.М. Метод наземного моделирования физиологических эффектов пребывания человека в условиях гипогравитации // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2015. Т. 160. № 9. С. 392.  
Baranov M.V., Katuntsev V.P., Shpakov A.V., Baranov V.M. A Method of Ground Simulation of Physiological Effects of Hypogravity on Humans // Bull. Exp. Biol. Med. 2016. V. 160. № 3. P. 401.
9. Kostas V.I., Stenger M.B., Knapp C.F. et al. Cardiovascular models of simulated Moon and Mars gravities: head-up tilt vs. lower body unweighting // Aviat. Space Environ. Med. 2014. V. 85. № 4. P. 414.
10. Antonutto G., di Prampero P.E. Cardiovascular deconditioning in microgravity: some possible countermeasures // Eur. J. Appl. Physiol. 2003. V. 90. № 3–4. P. 283.
11. Prisk G.K. Microgravity and the respiratory system // Eur. Respir. J. 2014. V. 43. № 5. P. 1459.
12. Доница Ж.А., Баранов В.М., Александрова Н.П., Ноздрачев А.Д. Дыхание и гемодинамика при моделировании физиологических эффектов невесомости. СПб.: Наука, 2013. 182 с.  
Donina Zh.A., Baranov V.M., Aleksandrova N.P., Nozdrachev A.D. Respiration and hemodynamics under simulated microgravity. St. Petersburg: Nauka, 2013. 182 p.

13. Juhl O.J., Buettmann E.G., Friedman M.A. et al. Update on the effects of microgravity on the musculoskeletal system // NPJ Microgravity. 2021. V. 7. № 1. P. 28.
14. Trappe T., Trappe S., Lee G. et al. Cardiorespiratory responses to physical work during and following 17 days of bed rest and spaceflight // J. Appl. Physiol. 2006. V. 100. № 3. P. 951.
15. Лысова Н.Ю., Бабич Д.Р., Резванова С.К. и др. Изменение физической работоспособности испытуемых в условиях 21-суточной “сухой” иммерсии // Авиакосм. и эколог. мед. 2020. Т. 54. № 4. С. 84. Lysova N.Yu., Babich D.R., Rezvanova S.K. et al. [Changes in physical performance of the subjects in the condition of 21-day dry immersion] // Aviakosm. Ekolog. Med. 2020. V. 54. № 4. P. 84.
16. Convertino V. Exercise and adaptation to microgravity environments / Handbook of Physiology: Section 4. Environmental Physiology. V. 3. Eds. Fregly M.J., Blatteis C.M. New York, NY: Oxford University, 1996. P. 815.
17. Moore A.D., Downs M.E., Lee S.M. et al. Peak exercise oxygen uptake during and following long-duration spaceflight // J. Appl. Physiol. 2014. V. 117. № 3. P. 231.
18. Hoffmann U., Moore A.D., Jr., Koschate J., Drescher U. VO<sub>2</sub> and HR kinetics before and after International Space Station missions // Eur. J. Appl. Physiol. 2016. V. 116. № 3. P. 503.
19. Capelli C., Antonutto G., Cautero M. et al. Metabolic and cardiovascular responses during sub-maximal exercise in humans after 14 days of head-down tilt bed rest and inactivity // Eur. J. Appl. Physiol. 2008. V. 104. № 5. P. 909.
20. Bringard A., Pogliaghi S., Adami A. et al. Cardiovascular determinants of maximal oxygen consumption in upright and supine posture at the end of prolonged bed rest in humans // Respir. Physiol. Neurobiol. 2010. V. 172. № 1–2. P. 53.
21. Ade C.J., Broxterman R.M., Moore A.D., Barstow T.J. Decreases in maximal oxygen uptake following long-duration spaceflight: Role of convective and diffuse O<sub>2</sub> transport mechanisms // J. Appl. Physiol. 2017. V. 122. № 4. P. 968.
22. Saveko A., Bekreneva M., Ponomarev I. et al. Impact of different ground-based microgravity models on human sensorimotor system // Front. Physiol. 2023. V. 14. P. 1085545.
23. Lathers C.M., Diamandis P.H., Riddle J.M. et al. Acute and intermediate cardiovascular responses to zero gravity and to fractional gravity levels induced by head-down or head-up tilt // J. Clin. Pharmacol. 1990. V. 30. № 6. P. 494.
24. Lathers C.M., Riddle J.M., Mulvagh S.L. et al. Echocardiograms during six hours of bedrest at head-down and head-up tilt and during space flight // J. Clin. Pharmacol. 1993. V. 33. № 6. P. 535.
25. Руденко Е.А., Баранов М.В., Захаров С.Ю. Исследование параметров центральной и периферической гемодинамики при длительном пребывании в условиях ортостатической и антиортостатической гипокинезии // Авиакосм. и эколог. мед. 2019. Т. 53. № 7. С. 40. Rudenko E.A., Baranov M.V., Zakharov S.Yu. [Studies of central and peripheral hemodynamics during extended orthostatic and antiorthostatic hypokinesia] // Aviakosm. Ekolog. Med. 2019. V. 53. № 7. P. 40.
26. Руденко Е.А., Черепов А.Б., Баранов М.В. и др. Исследование вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы при длительном пребывании в условиях ортостатической и антиортостатической гипокинезии // Авиакосм. и эколог. мед. 2020. Т. 54. № 1. С. 31. Rudenko E.A., Cherepov A.B., Baranov M.V. et al. [Studies of cardiovascular system autonomic regulation during extended exposure to horizontal and tilted bed rest and head-down tilt bed rest] Aviakosm. Ekolog. Med. 2020. V. 54. № 1. P. 31.
27. Whittle R.S., Keller N., Hall E.A. et al. Gravitational dose-response curves for acute cardiovascular hemodynamics and autonomic responses in a tilt paradigm // J. Am. Heart. Assoc. 2022. V. 11. № 14. P. e024175.
28. Григорьев А.И., Потанов А.Н., Джонс Дж.А. и др. Медицинское обеспечение межпланетных полетов / Космическая биология и медицина. Российско-американское сотрудничество в области космической биологии и медицины // Под ред. Пестова И.Д., Соуин Ч.Ф., Чаус Н.Г., Хансон С.И. М.: Наука, 2009. С. 627. Grigor'ev A.I., Potanov A.N., Jones J. et al. Medical support of interplanetary flights / Space Biology and Medicine. Russian and U.S. Cooperation in Space Biology and Medicine // Eds. Pestov I.D., Souin Ch.F., Chaus N.G., Hanson S.I. Moscow: Nauka, 2009. P. 627.

## Cardiorespiratory Reactions During Submaximal Exercise in Humans after 14-Day Simulated Lunar Gravity

A. A. Puchkova<sup>a, \*</sup>, A. V. Shpakov<sup>a, b</sup>, V. P. Katuntsev<sup>a</sup>, D. M. Stavrovskaya<sup>a</sup>, G. K. Primachenko<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Institute of Biomedical Problems of the RAS, Moscow, Russia

<sup>b</sup>Federal Science Center of Physical Culture and Sport (VNIIFK), Moscow, Russia

\*E-mail: alina.a.puchkova@gmail.com

The paper presents main results of a study on the influence of the physiological effects of simulated lunar gravity on cardiorespiratory responses to exercise in humans. Twelve healthy male volunteers aged 19–31 years (M ± SD: 22.5 ± 4.0 years) took part in the study. They were under 14-day head-up bed rest at +9.6°

angle (HUBR) relative to the horizon as a model for the physiological effects of lunar gravity. Cardiopulmonary exercise testing (CPET) was performed 7 days before the onset of HUBR and on the next day after the end of the experimental exposure. A 3-stage cycle ergometer test with 5-minute platforms at 125, 150, and 175 watts was used as a CPET protocol. Exposure of subjects to simulated lunar gravity reduced their tolerance to physical load. This was indicated by more pronounced changes for such parameters of cardiorespiratory system as heart rate, minute ventilation of the lungs, ventilatory equivalents for oxygen and carbon dioxide, as well as a less pronounced increase in oxygen consumption and oxygen pulse during CPET after 14 days of exposure to HUBR.

*Keywords:* cardiorespiratory system, physical performance, cardiopulmonary exercise testing, head-up bed rest, lunar gravity.