

УДК 681.51.012: 531.5

МЕТОДОЛОГИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРИФЕРИЧЕСКОГО КРОВОТОКА В СЕАНСАХ ГРАВИТАЦИОННОЙ ТЕРАПИИ

© 2013 В.А. Акулов¹, И.В. Макаров², А.Ю. Сидоров², Е.С. Лопухов²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

²Самарский государственный медицинский университет

Поступила в редакцию 22.11.2013

Разработана методология сравнительных клинических исследований периферического кровотока в условиях земной и искусственной гравитации; описана беспроводная система динамического мониторинга лодыжечно-плечевого индекса. Приведены результаты исследований, представляющие значительный интерес для космической медицины и практического здравоохранения.

Ключевые слова: искусственная гравитация, лодыжечно-плечевой индекс, периферический кровоток.

ВВЕДЕНИЕ

К числу новых медицинских технологий восстановительной медицины относится гравитационная терапия (ГТ). Под ГТ понимаются физиотерапевтические процедуры, заключающиеся в воздействии на организм человека управляемым центробежным ускорением, создаваемым короткорadiusной центрифугой (ЦКР). На рис. 1 представлена фотография ЦКР, которая применяется в Самарском государственном медицинском университете (СамГМУ) при лечении заболеваний, связанных с нарушением периферического кровообращения, при лечении облитерирующих заболеваний нижних конечностей методом ГТ [1].

В результате гравитационного воздействия происходит перераспределение циркулирующей в организме крови с преимущественным ее депонированием в ногах. Это приводит к усилению и/или восстановлению кровообращения в конечностях, утраченное в связи с заболеваниями и длительным пребыванием в состоянии гипокнезии и гиподинамии.

В сеансах ГТ особую актуальность имеют задачи контроля динамики клинических проявлений и оценки полученных результатов [1]. В их числе, сравнительный анализ физиологических реакций системы кровообращения на моделируемую гравитацию. Как известно, к числу основных методов изучения регионарной гемодинамики нижних ко-

нечностей относится ультразвуковая доплерография (УЗДГ). Она позволяет оценить не только качественные, но и количественные показатели [2]. Однако из-за наличия ряда факторов, существуют проблемы, связанные с интерпретацией и количественной оценкой доплерограмм. Так, например, амплитуда кривой (антеградной и ретроградной волн) зависит от положения датчика, угла его наклона относительно кровотока, глубины проникновения ультразвука в ткани, настройки режима усиления сигнала, фоновых помех, наложения венозных шумов и т.д. [3, 4].

В условиях ГТ указанные и им подобные факторы многократно усложняют процедуры УЗДГ, но, что особенно важно, существующие методики становятся недостаточными. Прежде всего, принятая в медицине "парная" схема обследования вида "врач – пациент" утрачивает работоспособность. Во вращающуюся среду, создаваемую ЦКР, может быть помещён только пациент. Таким образом, в сеансах ГТ возникает проблема создания и применения новых технологических схем оценки изменения регионарной перфузии в нижних конечностях.

В поисках выхода из создавшихся затруднений были проведены исследования, показавшие целесообразность оценки параметров периферического кровообращения по лодыжечно – плечевому индексу (ЛПИ). Во-первых, ЛПИ относится к объективным и чувствительным показателям окклюзирующего процесса и отражает степень функциональной недостаточности кровообращения конечности. Во-вторых, ЛПИ служит стандартом в эпидемиологических исследованиях, специальных сосудистых лабораториях и амбулаторной практике. В-третьих, ЛПИ может быть использован в качестве скрининг - метода оценки эффективности лечения, а также мониторинга течения заболевания перифери-

Акулов Владислав Алексеевич, доктор технических наук, доцент кафедры космического машиностроения.

E-mail: vladislav.a.akulov@gmail.com

Макаров Игорь Валерьевич, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой хирургических болезней № 1.
Сидоров Александр Юрьевич, кандидат медицинских наук, доцент кафедры хирургических болезней № 1.

E-mail: sidorov_024@mail.ru

Лопухов Евгений Сергеевич, врач-хирург, аспирант кафедры хирургических болезней № 1.

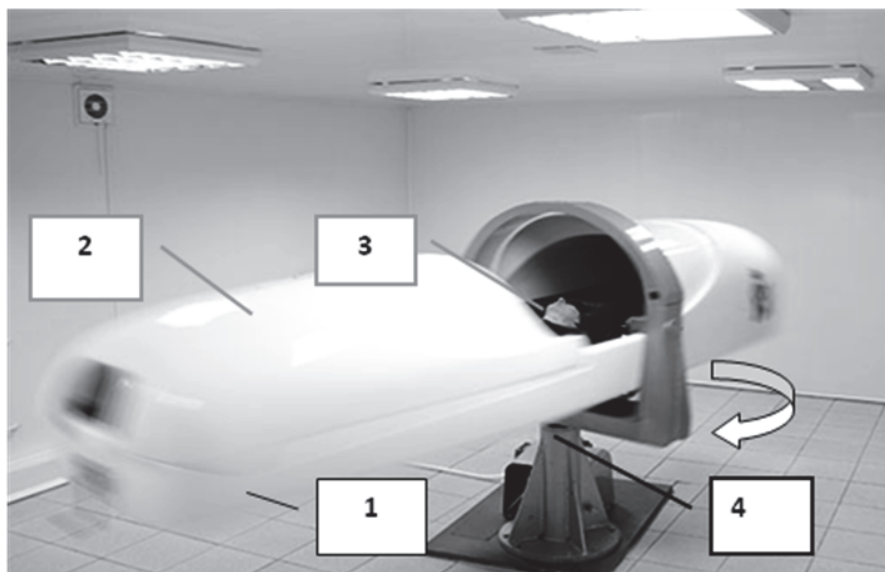


Рис. 1. Короткорadiusная центрифуга (ЦКР):

1 – ротор-горизонтальный стол; 2 – кабина пациента; 3 – пациент в позе «лёжа»; 4 – ось вращения

ческих артерий [3, 4].

Так же к числу нерешённых задач ГТ относится оценка адекватности ИСТ и естественной силы тяжести (ЕСТ, гравитация Земли). Речь идёт о количественной оценке сходства / различий ИСТ и ЕСТ с позиций моделирования параметров периферического кровообращения (ПК).

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разработка и апробация методологии сравнительного анализа параметров периферического кровообращения в нижних конечностях человека в сеансах гравитационной терапии и в условиях земной гравитации.

Задачи исследований:

1. Разработка методических основ сравнительных исследований периферического кровотока в условиях управляемой ИСТ и земной силы тяжести.

2. Разработка многоканальной, дистанционно управляемой системы измерения артериального давления, адаптированной к задачам ГТ и не требующей программирования.

3. Оценка достоверности энергетического критерия адекватности ИСТ и ЕСТ, примененного при исследованиях, по результатам сравнительного анализа ЛПИ.

4. Проверка гипотезы об эффекте локомоции в сеансах ГТ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основные положения методики сравнительных исследований ПК в условиях управляемой ИСТ (ЦКР) и земной силы тяжести (задача 1), состоящей из девяти последовательно выполня-

емых медико-технических процедур, представлены в табл. 1.

Существующие подходы к оценке адекватности ИСТ и ЕСТ по величине перегрузки на уровне стопы (+Gz) недостаточны для определения указанных режимов. В связи с этим, для оценки адекватности ИСТ и ЕСТ, а также при планировании экспериментов с определением индивидуализированных режимов гравитационной нагрузки был выбран δ - критерий [5].

Методом компьютерного моделирования установлен ранее малоизученный эффект, возникающий в сеансах вращения человека на ЦКР и заключающийся в частичной имитации локомоции человека на поверхности Земли [6]. Если эффект существует, а для его подтверждения необходим соответствующий эксперимент, то имеется перспектива его целенаправленного применения, а это, в свою очередь, весьма значимо для космической и восстановительной медицины. Изложенные выше данные, а также многолетний положительный опыт ГТ послужили основанием для нижеследующей постановки задачи.

В качестве примера на рис. 2 приведён типовой экран компьютерной программы, применённой при планировании экспериментов (процедура 1, табл. 1). Управление программой отличается простотой и сводится к следующим действиям. Вводятся антропометрические данные пациента (область А) и его смещение относительно оси ЦКР в радиальном направлении (область Б). Вводится требуемый режим адекватности в %% относительно нормы, которая составляет 0 %. Вводимом на рис. 2 примере задан режим гипогравитации с интенсивностью, составляющей – 20% от номинальной величины (область В). После нажатия на кнопку “Рассчитать N” в окне, расположен-

Таблица 1. Основные медико-технические процедуры сравнительных исследований

| № | Наименование процедуры | Примечание |
|---|--|--|
| 1 | Планирование экспериментов с привлечением компьютерного моделирования. | Определяются индивидуализированные режимы вращения, соответствующая имитации нормы (ортостаз), гипогравитация (нагрузка -20%), умеренная гипергравитация (+20%). |
| 2 | Измерение ЛПИ при клиностатике. | Оценка состояния пациента по существующим стандартам. Исключение патологии периферического кровообращения. |
| 3 | Измерение ЛПИ при ортостазе. | Базовая информация для сравнительного анализа и оценки достоверности энергетического критерия адекватности. |
| 4 | Десятиминутная степ-проба с измерением ЛПИ на 5-й мин и по её окончании. | Исходная информация о проверке гипотезы об имитации локомоции в условиях ИСТ. |
| 5 | Сеанс ГТ № 1. Выход на режим пониженной гравитационной нагрузки (-20% от нормы). Измерение ЛПИ на 2-й и 8-й мин сеанса. | Реализация режима гипогравитации, определённого при планировании (пункт 1). Базовая информация для оценки достоверности критерия адекватности. |
| 6 | Сеанс ГТ № 2. После отдыха, выход ЦКР на режим номинала (минимум отличий по критерию адекватности). Измерение ЛПИ на 2-й и 8-й мин сеанса. | Режим номинала определяется при выполнении процедуры 1. Базовая информация для оценки достоверности критерия адекватности. |
| 7 | Сеанс ГТ № 3. Выход на режим умеренной гипергравитации (+20%). Измерение ЛПИ на 2-й и 8-й мин сеанса. | Режим определяется при выполнении процедуры 1. Базовая информация для оценки достоверности критерия адекватности. |
| 8 | Останов ЦКР. | Завершение сеанса ГТ. |
| 9 | Повторное измерение ЛПИ при клиностатике. | Оценка стабильности СК и оценка кумулятивного эффекта. |

ном в области Г выдаётся частота вращения, обеспечивающая выполнение поставленной задачи, причём индивидуальная для каждого из пациентов. В данном примере $n = 31,5$ об/мин.

Важной особенностью компьютерной модели является применение приёмов когнитивной графики. К ним относится автоматически маш-

табируемая в соответствии с исходными данными (области А и Б) анатомическая схема пациента, которой отведена значительная часть экрана. Кроме того, выводятся автоматически масштабируемые графики, характеризующие состояние пациентов, в виде распределения по продольной координате (радиусу Z) гидростатического дав-

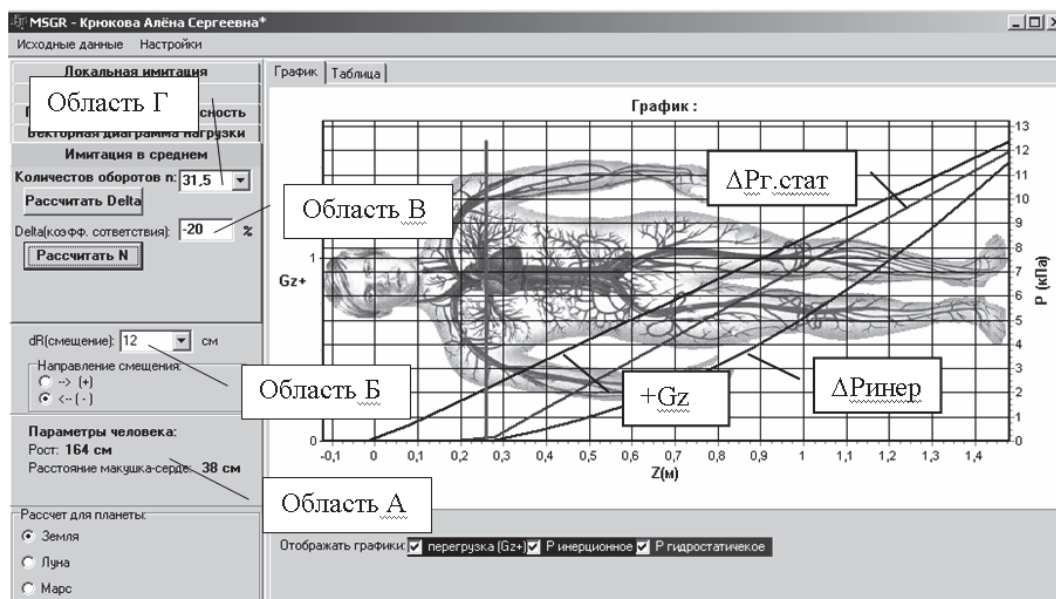


Рис. 2. Типовой экран компьютерной программы, применённой при планировании экспериментов

ления ($\Delta P_{г.стат}$), являющегося эталоном (объектом моделирования), распределения инерционного давления, обусловленного вращением ($\Delta P_{инер}$) и перегрузок ($+Gz$). Это создаёт значительные преимущества при разработке программ испытаний по сравнению с традиционным подходом, не оснащённым компьютерным моделированием. В частности, как следует из рис. 2, назначенный режим относится к гипогравитации, поскольку повышение периферического давления, обусловленного вращением ($\Delta P_{инер}$), ниже гидростатического ($\Delta P_{г.стат}$) на всём протяжении от сердца до стопы. Результаты моделирования выдаются как в графической форме (рис. 2) так и табличной. Шаг дискретизации выбирается по усмотрению пользователя. Предусмотрены две шкалы измерения давления – в мм. рт. ст. и в КПа.

Компьютерная модель прошла успешную апробацию на реальной информации в условиях крупного медицинского учреждения и показала свою эффективность как технического средства врача ГТ и средства обучения. В частности, более сорока студентов IV, V курсов освоили технологию планирования экспериментов в ГТ.

В соответствии с постановкой второй задачи была разработана система измерения (СИ) систолического артериального давления, состоящая из четырёх основных элементов: двух измерителей давления со встроенной памятью; радиопередатчика сигналов на включение измерителей (команда “Пуск”), не требующих программирования; приёмников сигналов и согласующих устройств (коммутаторов). На рис. 3 приведена фотография приборов СИ, применённых при исследовании периферического кровотока на ЦКР.

Кнопка “Пуск” и передатчик находятся на пульте управления (на рис. 3 не показаны).

В результате проведенного поиска и апробации ряда приборов в условиях ГТ в качестве измерителей давления были выбраны автоматические тонометры Omron M3 Expert, как наиболее полно удовлетворяющие предъявляемым требованиям.

Для дистанционного управления тонометрами была применена беспроводная система, состоящая из одного портативного передатчика, смонтированного в одном корпусе с кнопкой “Пуск”, и двумя приёмниками, настроенными на один канал. В целях сокращения изложения описание приёмников и коммутатора не приводим. Отметим, что она отличается простотой применения (не требуется программирования), высокой эффективностью и низкой стоимостью.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разработанная методика предусматривает трёхэтапное выполнение исследований (табл. 1). Первый этап состоит в выполнении процедур 1 – 4. На втором этапе выполняются три сеанса ГТ, отличающиеся величиной гравитационной нагрузки и двукратным измерением ЛПИ (процедуры 5 – 8). На третьем этапе (процедура 9) производится контрольное определение ЛПИ по сокращённому варианту. В исследованиях приняли участие 27 здоровых человек: 19 женщин и 8 мужчин. Средний возраст составил 21 год. ЛПИ рассчитывался по формуле (1).

Измерения ЛПИ лёжа в покое полностью соответствовали референсным значениям для здоровых лиц, что исключало у испытуемых возмож-

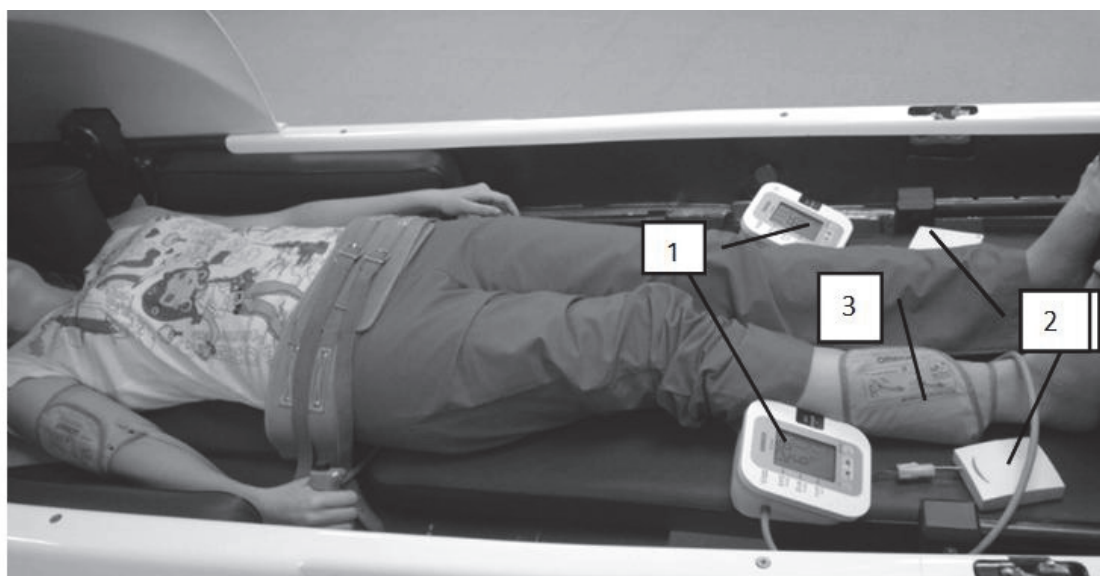


Рис. 3. Приборы СИ, применённые при исследовании периферического кровотока на ЦКР: 1 – тонометры; 2 – приёмники сигналов с встроенными коммутаторами и антеннами; 3 – манжета для измерения САД НК

ную скрытую патологию системы кровообращения, и в среднем составил $1,10 \pm 0,06$. При ортостазе ЛПИ возрастало до $1,51 \pm 0,22$, что объясняется гидростатическим давлением столба крови, обусловленным действием земной гравитации.

В соответствии с процедурой 3 для оценки изменения регионарной гемодинамики в нижних конечностях при ходьбе выполнялись степ-пробы с измерением ЛПИ на пятой и десятой минуте. Были выявлены две группы пациентов. В первой группе в среднем значения ЛПИ практически не изменялись, по сравнению с ортостазом, и составили $1,42 \pm 0,36$ на 5-й минуте и $1,54 \pm 0,32$ к 10-й минуте. Во второй группе испытуемых (14 человек из 27) происходило снижение АД в нижних конечностях, и соответственно ЛПИ, к 5-й и особенно резко к 10-й минуте, несмотря на то, что исследование проводилось на здоровых молодых добровольцах. Снижение ЛПИ, а, соответственно, и уменьшение регионарного кровотока в нижних конечностях при ходьбе, очевидно связано с уровнем физической подготовки испытуемых вследствие детренированности и низкой компенсаторной возможностью сердечно-сосудистой системы. У данных лиц значение ЛПИ к 5-й минуте снижались до $1,34 \pm 0,36$. У двух испытуемых к 10 минуте ходьбы ЛПИ снизился до $0,86 \pm 0,10$, т. е. значительно, достигая нижней границы референсных значений.

При исследовании ЛПИ в условиях ГТ при трёх режимах вращения (см. процедуры 5 – 7) получены следующие результаты. В сеансах ГТ соответствующих гипогравитации ($\delta = -20\%$) к 8-й минуте вращения ЛПИ достигал значений $1,34 \pm 0,54$, что прогнозируемо ниже значений при ортостазе и степ-пробах. На второй минуте вращения в режиме моделирования земной гравитации (минимум отличий ИСТ и ЕСТ из числа возможных, процедура 6) ЛПИ составил в среднем $1,42 \pm 0,45$. К восьмой минуте сеанса он предсказуемо повышался до $1,54 \pm 0,35$. Важно отметить, что аналогичные величины ЛПИ были получены при степ-пробах. Это позволяет заключить, что в сеансах ГТ при номинальных режимах вращения в определенной мере моделируются параметры периферического кровотока, характерные для ходьбы, исключая усталость свойственную любым физическим нагрузкам. После остановки ЦКР происходило снижение ЛПИ до референсных значений $1,18 \pm 0,18$, что сопоставимо с повышением ЛПИ при ортостазе.

Таким образом, в результате выполнения процедур по пунктам 1 – 6 предлагаемой методики (табл. 1) получено экспериментальное подтверждение гипотезы о существовании эффекта локомоции в сеансах ГТ, что имеет важное научно-практическое значение, как в восстановительной, так и космической медицине.

При исследованиях на режиме умеренной гипергравитации, интенсивность которой по критерию адекватности превышала земную на $+20\%$ (процедура 7), зарегистрировано повышение ЛПИ до $1,65 \pm 0,42$ на 2-й минуте и до $1,84 \pm 0,41$ на 8-й минуте. Как видно из сравнения, ЛПИ при данном режиме вращения ЦКР значительно выше, чем при номинальном режиме, ортостазе и ходьбе. Повышение АД в нижних конечностях происходило у всех испытуемых, вне зависимости от компенсаторных возможностей системы кровообращения и тренированности, и имело тенденцию к возрастанию по времени. Эти данные свидетельствуют о достоверности компьютерной модели по оценке адекватности ИСТ и ЕСТ по параметрам ПК. После завершения сеанса ЛПИ снижался до $1,10 \pm 0,07$.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методология сравнительного анализа параметров периферического кровообращения в сеансах гравитационной терапии и в условиях земной гравитации. Она предусматривает выполнение последовательности из девяти медико-технических процедур, из которых часть выполняется вне ЦКР, а часть на ЦКР в сеансах ГТ. Впервые на практике применены методы активного планирования сеансов ГТ с применением компьютерного моделирования.

2. Разработана многоканальная, дистанционно управляемая система измерения ЛПИ, позволяющая оценить состояние периферического кровотока у пациентов во время сеансов ГТ в произвольные моменты времени. Система отличается высокой эффективностью и простотой применения.

3. В ходе исследования подтверждена достоверность выбранного δ -критерия адекватности, разработанного одним из соавторов данной статьи. Это позволяет применить его для повышения эффективности сеансов ГТ.

4. Получено подтверждение гипотезы об эффекте моделирования ходьбы в сеансах вращения человека на ЦКР, за исключением усталости, свойственной любым физическим нагрузкам. Этот результат имеет значение при лечении пациентов с ограниченными физическими возможностями. Кроме того, он представляет интерес для космической медицины, прежде всего для подготовки и проведения экспериментов по моделированию гравитации Земли и Марса в условиях космических аппаратов с помощью ЦКР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галкин Р.А., Макаров И.В. Гравитационная терапия в лечении больных облитерирующими заболеваниями артерий нижних конечностей. Самара, 2006. 198с.

2. *Никитина Ю.М., Труханова А.И.*, Ультразвуковая доплеровская диагностика в клинике, Москва-Иваново, МИК, 2004.
3. *Лелюк В.Г., Лелюк С.Э.* Ультразвуковая ангиология, М 1999.
4. Национальные рекомендации по ведению пациентов с сосудистой артериальной патологией (Российский согласительный документ). Часть 1. Периферические артерии. М.: Изд-во НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН, 2010. 78 с.
5. *Акулов В. А.* Мехатронные системы генерации искусственной силы тяжести наземного и космического применения [под ред. Г. П. Аншакова]. М. Машиностроение. 2011. 161 с.

METHODS AND RESULTS OF STUDYING THE PERIPHERY BLOODSTREAM IN THE CONDITIONS OF GRAVITATIONAL THERAPY

© 2013 V.A. Akulov¹, I.V. Makarov², A.U. Sidorov², E.S. Lopukhov²

¹ Samara State Aerospace University named after Academician S. P. Korolyov (National Research University)

² Samara State Medical University

A system of methods to do comparative clinical study of periphery blood torrent under Earth gravitation and controlled artificial weight power. Wireless system of distant control for monitoring ankle brachial index. The results of the research, that are of considerable interest for space medicine and applied health service, are given.

Keywords: artificial weight power, ankle brachial index, periphery blood torrent

Vladislav Akulov, Doctor of Technics, Associate Professor at the Department Space Engineering.

E-mail: vladislav.a.akulov@gmail.com

Igor Makarov, Doctor of Medicine, Professor, Head at the Surgical Diseases № 1.

Alexander Sidorov, Candidate of Medicine, Associate Professor at the Surgical Diseases № 1. E-mail: sidorov_024@mail.ru

Eugene Lopukhov, Surgeon, Graduate Student at the Surgical Diseases № 1.