

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора биологических наук, профессора, члена-корреспондента РАН Герасименко Юрия Петровича на диссертационную работу Алексея Васильевича Шпакова «Механизмы адаптационных перестроек опорно-двигательного аппарата человека при различных уровнях гравитационной разгрузки», представленную на соискание ученой степени доктора биологических наук по специальности 3.3.7. – Авиационная, космическая и морская медицина.

Актуальность. Гравитационная разгрузка приводит к адаптационным перестройкам опорно-двигательного аппарата человека, и, как следствие, к изменению жизненно важной функции организма человека-локомоции. Изучение функционального состояния опорно-двигательного аппарата при воздействии различных уровней гравитационной разгрузки до настоящего времени не было предметом комплексного изучения. Данная проблематика имеет фундаментальное значение для оценки функционального состояния опорно-двигательного аппарата в различных условиях деятельности человека и является крайне актуальной. Изучение механизмов адаптации опорно-двигательного аппарата человека к изменяющимся условиям внешней среды является важным направлением исследований в физиологии двигательной системы, восстановительной и космической медицине. Актуальность выполненного А.В. Шпаковым исследования определяется как теоретической, так и практической значимостью использования комплексного подхода при изучении функционального состояния опорно-двигательного аппарата человека, позволяющего исследовать не только отдельные характеристики двигательной системы, но и сформировать представления об общей картине адаптационных перестроек опорно-двигательного аппарата человека в условиях гравитационной разгрузки. Особую важность и актуальность представляют используемые в исследовании модели гравитации, в частности – модель лунной гравитации, имеющей важное значение для подготовки пилотируемого полета к Луне и пребывания на лунной поверхности.

Таким образом, изучение механизмов адаптационных перестроек опорно-двигательного аппарата человека и исследование локомоторной функции при различных уровнях гравитационной разгрузки является актуальной проблемой, как для физиологии движений, так и для космической физиологии и медицины.

Новизна научного исследования и полученных результатов.

В диссертационном исследовании А.В. Шпакова впервые выполнена комплексная оценка состояния опорно-двигательного аппарата в

ИМБП ВХ. № 08/967
от «24» 03 2025 г.

экспериментальных условиях, включающих наземные модельные эксперименты (анти- и ортостатическая гипокинезия, «сухая» иммерсия, вертикальное вывешивание), а также до и после длительных космических полетов. В работе использован широкий набор тестовых протоколов, с использованием циклических локомоций в различных условиях их реализации (ходьба по горизонтальной и наклонной поверхности, бег, педалирование на велоэргометре), а также скоростно-силовое тестирование.

Новизна и научная значимость работы состоит в том, что автору впервые удалось показать, что различная степень гравитационной разгрузки приводит к специфическим изменениям состояния опорно-двигательного аппарата, и соответственно, к специфичности использования афферентных сигналов в регуляции циклических локомоций и изменениям стратегии ее реализации. Получены новые данные о биомеханических характеристиках локомоций при различных уровнях действия гравитации. Новыми также являются результаты оценки динамики восстановления биомеханических характеристик ходьбы человека в послеполетном периоде в зависимости от объема и интенсивности физических тренировок, выполняемых космонавтами на протяжении длительных космических полетов.

Впервые проведены исследования и представлены результаты изучения характеристик опорно-двигательного аппарата при ортостатической гипокинезии и ее влияние на регуляцию локомоции. Эти исследования являются оригинальными, поскольку изучение функционального состояния двигательной системы в условиях моделированной лунной гравитации прежде не проводились.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов, рекомендаций и заключений диссертации. Достоверность и обоснованность основных положений и выводов диссертации Шпакова А.В. обеспечивается использованием адекватных и современных методов исследований, обширным фактическим материалом, достаточной численностью обследованного контингента, корректной интерпретацией результатов с привлечением данных мировой литературы при обсуждении результатов.

Необходимо подчеркнуть высокий научно-методический уровень проведенных исследований, носящих комплексный характер — регистрация кинематических, электромиографических, пространственно-временных характеристик локомоций (многосуставные движения), скоростно-силовых и электромиографических характеристик односуставных движений.

Выводы соответствуют поставленным задачам и подтверждают положения, вынесенные на защиту.

Значимость результатов, полученных в диссертации для науки и практики. Исследование Шпакова А.В., несомненно, является существенным вкладом в теоретические представления о сенсомоторных механизмах регуляции локомоции человека.

Достижением являются выявленные особенности регуляции и реализации локомоции при различных гравитационных нагрузках. Эти данные представляют значительный интерес и могут быть использованы при разработке новых методик двигательной реабилитации пациентов с двигательной патологией различного генеза.

Результаты диссертационного исследования могут также использоваться в качестве теоретической основы при разработке новых средств и методов профилактики неблагоприятных эффектов гравитации на организм человека.

Практическая значимость исследования А.В. Шпакова заключается в разработке комплексной методики оценки опорно-двигательного аппарата человека, которая представляет собой вклад в развитие средств и методов оценки произвольных движений космонавтов в пред- и послеполётный период, а также в комплексных наземных исследованиях с участием добровольцев применительно к решению задач космической медицины. В этой связи особо следует отметить исследования моделирования полета к Луне и пребывание на ее поверхности, когда испытуемые последовательно находились в положении антиортостатической гипокинезии (полет), а затем в ортостатической гипокинезии (лунная гравитация).

Диссертационная работа А.В. Шпакова имеет высокую научную значимость, содержание диссертации полностью отражено в автореферате и публикациях автора.

Характеристика содержания диссертационной работы. Целью диссертационного исследования А.В. Шпакова являлась комплексная оценка особенностей функционального состояния опорно-двигательного аппарата человека при разных уровнях гравитационной разгрузки. Были сформулированы 7 задач, корректное решение которых обеспечивалось соответствующими теоретическими и экспериментальными методами исследования. Экспериментальный материал базируется на данных, полученных при обследовании 146 испытуемых в разных экспериментальных условиях. Диссертация изложена на 325 страницах, состоит из введения, восьми глав, заключения, выводов, списка литературы и приложений. Иллюстрирована 94 рисунками и 24 таблицами. Список литературы состоит из 399 источников, из которых 116 представлены в русскоязычных периодических изданиях, 283 – в иностранных. Диссертация написана по типу монографии,

каждая глава предваряется введением в проблему, изложением результатов исследования, обсуждением и завершается кратким резюме.

Во Введении сформулированы основные положения диссертационного исследования: актуальность, цель и задачи, гипотеза, направление, научная новизна, положения, выносимые на защиту, определены теоретическая и практическая значимость результатов исследования.

Первая глава содержит обзор литературы и посвящена обоснованию проблематики предстоящего исследования. На основе анализа литературы отечественных и зарубежных авторов приведены сведения о влиянии факторов реального космического полета и наземного моделирования отдельных его факторов на функциональное состояние опорно-двигательного аппарата, в частности, на мышечную систему.

Во второй главе определены методы и представлена организация исследования, объем экспериментального материала, представлено описание экспериментальных условий проведенных исследований, среди которых основное место отведено классическим моделям невесомости — антиортостатической гипокинезии (АНОГ) и «сухой» иммерсии. Кроме того, заслуживает отдельного внимания использование ортостатической гипокинезии в качестве модели лунной гравитации.

В третьей главе представлены результаты биомеханического анализа локомоций (ходьбы) космонавтов до и после длительных космических полетов. Установлено, что после длительных космических полетов укорачивается длина шага, при этом время выполнения шагательного движения не меняется. К особенностям шагательных движений после космического полета относится увеличение угла в голеностопном суставе при постановке стопы и уменьшение разгибания голеностопного сустава при отталкивании.

Доказана преимущественная эффективность использования тренировок на тредмилле в интервальном режиме (или как отмечает автор — в соответствие с рекомендациями специалистов по физическим тренировкам) на послеполетное восстановление характеристик ходьбы, среди которых основными являются ЭМГ-стоимость (как показатель состояния мышечного аппарата) и длина шага (как показатель координационной структуры локомоций). По результатам данных исследований сделан также вывод, что не всегда увеличение объема и интенсивности тренировочных нагрузок в ходе длительных космических полетов оказывает положительный эффект на состояние мышечного аппарата нижних конечностей, что требует дальнейшей разработки средств профилактики.

В четвертой главе исследована динамика биомеханических характеристик быстрой и медленной ходьбы, упражнений на тренажерах (велозергометре) и скоростно-силовые свойства мышц нижних конечностей в экспериментах с АНОГ различной продолжительности. Установлено, что после АНОГ при ходьбе угловое перемещение в коленном суставе при постановке стопы и при отталкивании уменьшается, а при переносе стопы увеличивается, тогда как в голеностопном суставе при постановке стопы увеличивается, при отталкивании уменьшается, а при переносе угол в голеностопном суставе не изменяется. Разнонаправленные изменения кинематики голеностопного сустава свидетельствуют об изменении стратегии локомоций, обусловленной длительной гипокинезией. Предполагается, что уменьшение разгибания суставов нижних конечностей при ходьбе после АНОГ обусловлено снижением силовых свойств мышц передней поверхности бедра и задней поверхности голени.

В пятой главе диссертации представлены результаты, полученные при исследовании скоростно-силовых характеристик мышц нижних конечностей в иммерсионном эксперименте с участием женщин. Результаты данной главы можно отнести к научной новизне работы А.В. Шпакова, поскольку подавляющее большинство исследований в условиях «сухой» иммерсии выполнено с участием испытуемых мужчин. Автором показано, что изменения скоростно-силовых проявлений (максимальная произвольная сила, скорость достижения максимальной произвольной силы, градиент силы), наблюдаемые у женщин, по направленности изменений после экспериментального воздействия в 5-суточной «сухой» иммерсии не имели отличий по сравнению с результатами, полученными у мужчин в условиях 21-суточной АНОГ.

Шестая глава диссертации посвящена результатам экспериментальных исследований с моделированием лунной гравитации. Изучалось изменение функционального состояния опорно-двигательного аппарата в экспериментах с ортостатической гипокинезией продолжительностью 7 и 14 суток. Показано, что после гипокинезии изменения биомеханических характеристик ходьбы происходило в коленном и голеностопном суставах. В коленном суставе уменьшилась величина суставного угла при постановке стопы, а в голеностопном суставе уменьшилась амплитуда угловых перемещений во время отталкивания. Длительное воздействие ортостатической гипокинезии с переменным углом наклона тела оказывало аналогичные, но более выраженные влияния на характеристики ходьбы и бега, а также на скоростно-силовые характеристики мышечного аппарата нижних конечностей.

В седьмой главе автором предпринята попытка впервые смоделировать физиологические эффекты межпланетного полета. Для этой цели проведены

исследования с последовательным нахождением испытуемых в условиях АНОГ и ортостатической гипокинезии, что является уникальным для космической медицины. После гипокинезии изменения параметров шагательных движений при медленной ходьбе (60 шагов/минуту) происходили в тазобедренном и коленном суставах. В тазобедренном суставе амплитуда угловых перемещений в фазе отталкивания уменьшалась, а в коленном суставе амплитуда угловых перемещений увеличивалась в фазе переноса конечности. Кинематические характеристики движений в голеностопном суставе не изменялись.

После гипокинезии увеличение ЭМГ-активности происходило в проксимальных мышцах (*Vastus lateralis*, *Rectus femoris*, *Biceps femoris*) при постановке стопы, а в дистальных мышцах (*Tibialis anterior*) при переносе ноги.

При быстрой ходьбе (120 шагов/минуту) кинематические характеристики шагательных движений до и после гипокинезии практически не изменялись. Результаты анализа ЭМГ-активности мышц при ходьбе после гипокинезии характеризовались аналогичными изменениями в проксимальных мышцах и увеличением активности в дистальных мышцах при постановке стопы (*Tibialis anterior*) и при отталкивании (*Soleus*).

Положительный эффект применения тренировок на велоэргометре на этапе воздействия моделированной лунной гравитации проявлялся в сохранении на исходном уровне скоростно-силовых свойств мышечного аппарата нижних конечностей и нивелировании изменений биомеханических параметров ходьбы.

В восьмой главе диссертации представлены результаты изучения особенностей организации локомоций в условиях различной по величине разгрузки (17%, 38%, 70% веса тела) опорно-двигательного аппарата человека. Разгрузка опорно-двигательного аппарата методом вертикального вывешивания изменяет моторный паттерн ходьбы человека, что отражается на форме профилей ЭМГ-активности мышц в цикле двойного шага, обуславливает изменения как величины амплитуды ЭМГ, так и максимальной и минимальной активности мышц в цикле двойного шага, приводит к значительным изменениям кинематических характеристик ходьбы, а также изменениям опорных реакций и временных параметров ходьбы.

Так, при ходьбе с разгрузкой опорно-двигательного аппарата до 38% веса тела амплитуда ЭМГ *m. tibialis anterior* достоверно уменьшается на 15% и на 25% при ходьбе с разгрузкой 17% веса тела по сравнению с нормальной ходьбой. Амплитуда ЭМГ *m. soleus* и *m. gastrocnemius medialis* при ходьбе в условиях разгрузки опорно-двигательного аппарата также снижается.

Амплитуда ЭМГ m. soleus с разгрузкой 38% и 17% веса тела достоверно снижается на 17% и 48% относительно условий без вывешивания соответственно.

Изменение стратегии реализации локомоции выражалось в уменьшении амплитуды угловых перемещений в коленном суставе при отталкивании и ее увеличение при переносе ноги. В голеностопном суставе уменьшение амплитуды угловых перемещений происходило при постановке стопы и при переносе ноги, а увеличение амплитуды при отталкивании.

Выводы хорошо сформулированы, полностью соответствуют задачам исследования. Методы исследования и выводы, изложенные в диссертации, полностью соответствуют поставленным задачам.

Автореферат в полной мере отражает основные результаты диссертационного исследования. Результаты научных исследований опубликованы в 60 печатных работах, в том числе: 24 статьи в журналах из перечня ВАК РФ, а также включенных в базы данных Scopus и Web of Science, 36 тезисов докладов. Материалы исследования доложены и обсуждены на ведущих российских и международных конференциях, посвященных проблемам космической медицины и биологии.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы. Основные положения работы А.В. Шпакова могут стать теоретической базой и научным заделом для специалистов в области космической медицины, спортивной медицины, а также востребованы для реабилитационных мероприятий у пациентов с повреждениями спинного мозга и опорно-двигательного аппарата.

Достоинства и недостатки. Оценивая диссертационное исследование А.В. Шпакова в целом, следует отметить, прежде всего, ее высокую научную направленность, которая определила высокую результативность и важность заключений. Полученные результаты представляют большой интерес для фундаментальной науки в области физиологии двигательной активности, космической физиологии и медицины, а также для специалистов по двигательной нейрореабилитации. Материал диссертации изложен доступным языком, хорошо иллюстрирован большим количеством рисунков.

Я не вижу недостатков работы и у меня нет замечаний принципиального характера, однако имеется ряд вопросов, на которые хотелось бы получить ответ.

В работе и в выводах автор говорит о двух стратегиях реализации локомоций при гравитационной разгрузке и характеризует эти стратегии.

Однако остается не совсем понятным при каких моделях гравитации реализуется та или иная стратегия.

Второй вопрос касается феномена ухудшения функции, сопровождающейся усилением активности мышцы обеспечивающей эту функцию. Например, после той или иной гравитационной разгрузки при ходьбе уменьшается период опоры (ухудшается функция проталкивания тела), но при этом увеличивается ЭМГ активность гравитационных мышц голени (*Soleus*, *Gastrocnemius*) по сравнению с контролем. Имеются ли прямые доказательства, что увеличение мышечной активности связано с изменением состава активирующихся двигательных единиц?

Следующий вопрос касается модели лунной гравитации. Эффекты лунной гравитации тестировались при ходьбе по тредбану. Представляется, что логичным было бы протестировать локомоторную функцию в условиях вертикальной вывески при величине разгрузки (17% веса тела), соответствующей лунной гравитации после ортостатического моделирования гипогравитации.

В главе 7 подробно изучены характеристики локомоторной активности при ходьбе по тредбану с разным углом наклона. Получен интересный материал по особенностям локомоторного поведения при ходьбе в условиях спуска и подъема. Что дают эти данные для решения основных задач поставленных в диссертационном исследовании? Хотелось, чтобы диссертант прокомментировал этот результат.

В работе показано, что после длительной опорной разгрузки при реализации локомоции увеличивается амплитуда углового перемещения в голеностопном суставе при постановке стопы. Это важный факт, свидетельствующий о регуляции позиционирования стопы на опору. Однако это отсутствует при ходьбе в условиях вертикальной вывески. Как это можно проинтерпретировать?

Указанные замечания не снижают ценности проведенных автором исследований и сделанных на их основе выводов.

Заключение

Диссертационная работа Шпакова Алексея Васильевича «Механизмы адаптационных перестроек опорно-двигательного аппарата человека при различных уровнях гравитационной разгрузки» является законченной научно-квалификационной работой, совокупность теоретических положений которой можно квалифицировать как крупное научное достижение в области космической медицины. Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук (пп. №9-14

«Положения о присуждении учёных степеней» ВАК РФ, утверждённого постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. с последующими изменениями и дополнениями от 30 июня 2014 г., 21 апреля, 2 августа 2016 г., 29 мая, 28 августа 2017 г., 1 октября 2018 г., 20 марта, 11 сентября 2021 г., 26 сентября 2022 г., 26 января, 18 марта, 26 октября 2023 г., 25 января 2024 г.), а ее автор заслуживает присуждения ему учёной степени доктора биологических наук по специальности 3.3.7. – Авиационная, космическая и морская медицина.

Официальный оппонент

доктор биологических наук, профессор,
член-корреспондент РАН
заведующий лабораторией физиологии движения
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института физиологии им. И.П.
Павлова Российской академии наук



подпись

Герасименко
Юрий Петрович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физиологии им. И.П. Павлова Российской академии наук. 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, д.6.
Телефон: 8 (812) 328-11-01, факс: 8 (812) 328-05-01.
Адреса электронной почты: Pavlov.institute@infran.ru
Адрес в сети Интернет: <https://www.infran.ru/>

Подпись доктор биологических наук, профессора, члена-корреспондента РАН, заведующего лабораторией физиологии движения Герасименко Юрия Петровича ЗАВЕРЯЮ

Ученый секретарь Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
физиологии И.П. им. Павлова Российской академии
наук, кандидат биологических наук



подпись

Петропавловская
Екатерина Алексеевна

« 20 » марта 2025 г.