

На правах рукописи



Бабанов Никита Дмитриевич

**МОТОРНЫЙ КОНТРОЛЬ У ДОБРОВОЛЬЦЕВ В ЭКЗОСКЕЛЕТЕ И ПРИ
ВЫПОЛНЕНИИ ЗАДАЧИ С ВИЗУАЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ**

1.5.5 – Физиология человека и животных

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва

2022

Работа выполнена в **Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Научно-исследовательский институт нормальной физиологии имени П.К. Анохина».**

Научный руководитель: главный научный сотрудник лаборатории физиологии функциональных состояний человека ФГБНУ «НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина», доктор биологических наук, **Кубряк Олег Витальевич**

Официальные оппоненты: заместитель заведующего филиалом №1 ГАУЗ МНПЦ МРВСМ ДЗМ, врач-невролог, доктор медицинских наук, **Сичинава Нино Владимировна**

ведущий научный сотрудник, заведующая отделом сенсомоторной физиологии и профилактики Института медико-биологических проблем РАН, кандидат биологических наук, **Томиловская Елена Сергеевна**

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», **Институт биологии и биомедицины**

Защита диссертации состоится «22» декабря 2022 года в 11 часов на заседании Диссертационного совета 24.1.179.01 при ФГБНУ «НИИНФ им. П.К. Анохина» по адресу: 125009, г. Москва, ул. Моховая, д. 11, стр. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Научно-исследовательский институт нормальной физиологии имени П.К. Анохина» или на сайте института: rphys.ru. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 125315, г. Москва, ул. Балтийская, д. 8. Автореферат разослан «___» _____ 2022 года.

Ученый секретарь

Диссертационного совета 24.1.179.01,
доктор медицинских наук

Абрамова Анастасия Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Моторный контроль обычно рассматривают как область, изучающую управление центральной нервной системой целенаправленными, скоординированными движениями, во взаимодействии с собственным телом и окружающей средой [Latash M.L. et al., 2010, Ivanenko Y., Gurfinkel V., 2018]. Большой интерес к связанным с управлением позой и движениями сенсорным системам, касается, в том числе, актуальных вопросов нейрореабилитации и нейропластичности [Jo HJ, Perez MA, 2020]. Выделяется роль проприоцепции, опорной афферентации [Томиловская Е.С., Козловская И.Б., 2020; Герасименко Ю.П. и др., 2020; Левик Ю.П., 2020]. Моторное обучение с визуальной обратной связью, «сенсорную перекалибровку», применяют в практической медицине с целью компенсации или восстановления функции [Sergio LE. et al., 2020; Pellegrino L. et al., 2021; Котов С.В. и др., 2021]. Подразумевается также возможность приобретения актуальных моторных навыков в связи с нарушениями здоровья или адаптации к новым условиям [Stockinger C. et al., 2014]. Таким образом, различные аспекты сенсорного обеспечения позы и движений находятся в фокусе современных исследований, актуализируя и практические, и теоретические вопросы. В рамках современного развития теоретического наследия П.К. Анохина, тема во многом касается вопросов «компенсации функции» (1955).

Новым важным направлением, в связи с задачами практической медицины и промышленности, является изучение управления движениями и позой человека в устройствах типа экзоскелета [von Gliniski A. et al., 2019], в том числе, ограничивающих степени свободы. Если при выполнении привычных движений, при поддержании вертикальной позы, человек совершает «стандартный целостный акт» [Анохин П.К., 1968], то, в случае применения, например, пассивного экзоскелета нижних конечностей [Hassan M. et al., 2018], такой естественный «стандартный акт» движения модифицируется за счёт отличающейся от «обычной» афферентации. Например, отличная и от обычного стояния, и от обычного сидения, так называемая «гибридная поза» [Noguchi M. et al., 2019] предполагает специфическую афферентацию, замену «обычной» синергии мышц на «искусственную». Проведенный нами анализ массива публикаций – более 500 – выявил актуальность применения физиологических методов при исследованиях влияния экзоскелета на регуляцию позы и движений [Бабанов Н.Д., Кубряк О.В., 2020]. Распространение экзоскелетов [Письменная Е.В. и др., 2019] придаёт направлению практическую значимость.

Таким образом, актуальность работы обусловлена наличием мало исследованных вопросов сенсорного обеспечения управления позой и движениями в случае меняющейся афферентации (в том числе, в связи с применением экзоскелетов), изучением физиологических механизмов моторного обучения, соответствующих прикладных аспектов.

Цель и задачи

Цель: исследовать особенности управления целенаправленными движениями и позой человека в случае искусственного ограничения подвижности нижних конечностей, в условиях меняющейся проприцептивной афферентации.

В соответствии с поставленной целью, конкретные **задачи** работы:

1. Исследовать электромиографические показатели мышц ног (*musculus quadriceps femoris* и *musculus tibialis anterior*), а также стабилметрические показатели у условно здоровых добровольцев при организации «гибридной позы», обусловленной пассивным экзоскелетом нижних конечностей.
2. Исследовать активность мышц сгибателей (*musculus flexor digitorum superficialis*, *musculus flexor pollicis brevis*) и разгибателей (*musculus extensor digitorum*, *musculus extensor pollicis longus*) руки, силу надавливания рукой на силовой джойстик и особенности быстродействия в задаче с визуальной обратной связью при целенаправленных нажатиях кистями рук из положения сидя.
3. Исследовать особенности сенсомоторного контроля при ритмичном раскачивании из вертикальной позы и «гибридной позы».
4. Исследовать параметры опорных реакций (на силовой платформе) от верхних и нижних конечностей и электромиографические характеристики мышц нижних конечностей (*musculus quadriceps femoris* и *musculus tibialis anterior*) при выполнении рукой задачи с визуальной обратной связью в положении сидя и в «гибридной позе».

Научная новизна

Впервые подготовлен системный обзор, в котором обобщены и проанализированы физиологические методы, применяемые для изучения влияния внешних устройств типа экзоскелета на организацию позы и движений у человека, выявлены тренды направления (см. список работ по теме диссертации, п.5). Впервые предложен и запатентован с коллективом авторов способ оценки функции верхних конечностей (RU 2725055), включающий совместную регистрацию силовых показателей и поверхностной электромиографии, результат действия, и их комплексный анализ. Впервые выявлена взаимосвязь стабильности поддержания позы в пассивном экзоскелете нижних конечностей с сенсорным обеспечением свободной вертикальной позы. Установлено, что исходные соотношения «веса» сенсорных систем влияют на организацию движений и позы человека в случае искусственного ограничения подвижности нижних конечностей. В частности, описана взаимосвязь преобладания проприоцептивного или зрительного контроля со стабильностью добровольцев в «гибридной позе» (в экзоскелете нижних конечностей). Выявлено перераспределение активности мышц-сгибателей и мышц-разгибателей рук при последовательных повторениях управляющих нажатий кистями рук на неподвижную рукоять (силовой джойстик)

проявляющееся в уменьшении вертикальной силы давления рукой на джойстик при последовательных повторениях в заданных условиях. Впервые установлено, что качество поддержания «гибридной позы» при целенаправленном раскачивании тела связано с вовлеченностью проприоцептивной системы в организацию исходной вертикальной позы. Выявлено влияние изменения проприоцептивной афферентации от нижних конечностей на организацию движений как нижних, так и верхних конечностей. Продемонстрированы нелинейные взаимосвязи активности мышц ног относительно контрлатеральной и ипсилатеральной управляющей руки.

Научно-практическая значимость

В общетеоретическом плане научная значимость полученных результатов (ниже, в разделе «Основное содержание работы») связана с развитием системных представлений об организации позы и движений, оценкой состояний человека с использованием характеристик паттерна целенаправленных движений – развивая работы О.В. Кубряка и соавторов. Находки и отдельные готовые решения (RU 2725055) данной работы могут иметь практическое значение, например, для комплексной оценки функции верхних конечностей пациента в различных областях практической медицины – в травматологии, неврологии, а также в спорте и эргономике. Материалы работы имели значимость для разработки первого по данному направлению государственного курса повышения квалификации врачей в ФГБОУ ДПО РМАНПО: «Силовые платформы (стабилоплатформы) в оценке регуляции вертикальной позы человека и восстановлении функции равновесия» (п.10 в списке публикаций по теме работы). Практические аспекты касаются также физиологического обеспечения при использовании экзоскелетов, решению вопросов их стандартизации, что имеет значение и для работы в рамках ПК-11 (с участием О.В. Кубряка и Н.Д. Бабанова от НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина) Технического комитета 320 Росстандарта.

Методология и методы исследования

Общая методология базировалась на теории функциональных систем П.К. Анохина, концепции иерархической организации движений Н.А. Бернштейна и других. В работе использовался комплекс физиологических методов, включая исследование опорных реакций, в том числе, оценка характера движения центра давления в плоскости опоры (включая частный случай – стабилometriю), и поверхностную электромиографию. Применялись ранее описанные оригинальные методические подходы [Кубряк О.В. и др., 2012, 2014, 2018]. Математическая, статическая обработка полученных данных проводилась на основе стандартных рекомендаций [Гланц С. и др., 1999]. Соблюдались современные этические принципы, согласно разрешению локальной этической комиссии, в соответствии с Хельсинкской декларацией Всемирной Медицинской Ассоциации, ГОСТ Р 56509-2015 «Услуги населению. Надлежащая практика гуманитарных исследований».

Положения, выносимые на защиту

1. Вид ведущей афферентации (проприоцептивной или зрительной) определяет качество системы сенсомоторного контроля при поддержании позы в условиях искусственного ограничения подвижности нижних конечностей в пассивном экзоскелете.

2. При выполнении короткого курса целенаправленных повторяющихся движений рук из положения сидя снижается активность мышц сгибателей (*musculus flexor digitorum superficialis*, *musculus flexor pollicis brevis*) и разгибателей (*musculus extensor digitorum*, *musculus ex-tensor pollicis longus*) руки, с оптимизацией двигательного усилия на силовой джойстик при стабильной результативности действий.

3. Качество управляющих нажатий рукой (на силовой джойстик) отличается в «гибридной позе» по сравнению с управлением из обычной сидячей позы, при одинаковом быстродействии.

Обеспечение достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов обеспечена комплексом мер: адекватной организацией исследования и выбором методик, проведением достаточного для статистически значимых результатов числа наблюдений, должным метрологическим обеспечением, внешним рецензированием публикаций по теме диссертации. Основные результаты диссертации обсуждены на всероссийских и международных конференциях: IV Международная научно-практическая конференция «Информатизация инженерного образования» – ИНФОРИНО-2018 (Москва, 2018); 24-я Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов (Москва, 2018); XLIV Итоговая сессия НИИ НФ им. П.К. Анохина (Москва, 2019); V Международная междисциплинарная конференция «Современные проблемы системной регуляции физиологических функций» (Халкидики, 2019); 2-й Российский Форум по ортопедии и реабилитационной технике (Москва, 2019); V Международный конгресс «Физиотерапия. Лечебная физкультура. Реабилитация. Спортивная медицина» (Москва, 2019); XLV Итоговая сессия НИИ НФ им. П.К. Анохина (Москва, 2020); VIII Всероссийская с международным участием конференция по управлению движением (Петрозаводск, 2020); XI Конференция молодых ученых с международным участием «Трансляционная медицина: возможное и реальное» (Москва, 2020); Первый национальный конгресс по когнитивным исследованиям, искусственному интеллекту и нейроинформатике SAICS-2020 (Москва, 2020); XIV Всероссийская (с международным участием) конференция «Биомеханика – «2020» (Пермь, 2020); Межлабораторный семинар лаборатории физиологии функциональных состояний человека НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина (Москва, 2020); V Всероссийская междисциплинарная конференция «Мотивационные аспекты физической активности» (Великий Новгород, 2021); XXVII Всероссийская конференция молодых учёных с международным участием «Актуальные проблемы

биомедицины – 2021» (Санкт-Петербург, 2021); XII Конференция молодых ученых с международным участием «Трансляционная медицина: возможное и реальное» (Москва, 2021); VI Всероссийская междисциплинарная конференция «Мотивационные аспекты физической активности» (Великий Новгород, 2022). Официальная апробация работы – на Учёном совете НИИ НФ им. П.К. Анохина (2022).

Публикации

Результаты диссертационной работы отражены в **18 публикациях**, из них **7 (статьи и патент) согласно критериям**, указанным в п. 11-13 постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», в изданиях согласно Приказу Министерства образования и науки РФ от 26.09.2022 № 1690 «Об утверждении правил формирования перечня рецензируемых научных изданий...», без учёта переводных версий журналов «Физиология человека» и «Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова».

Личный вклад автора

Непосредственно участвовал в замысле, организации и проведении наблюдения, получении исходных данных и их анализе, участвовал в разработке методического обеспечения работы, включая запатентованное решение, лично и совместно с соавторами обрабатывал и интерпретировал экспериментальные данные, лично и с соавторами подготовил публикации по выполненной работе, лично апробировал результаты работы.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 208 страницах машинописного текста, включает 30 таблиц и 38 рисунков. Состоит из введения, обзора литературы, материалов и методов исследований, результатов собственных исследований и их обсуждения, выводов, практических рекомендаций, списка сокращений, списка терминов, списка литературы и приложений. Список литературы содержит 232 источника, из них 55 отечественных и 177 зарубежных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Материалы и методы

В наблюдении участвовали условно здоровые праворукие добровольцы-мужчины возрастом от 18 до 25 лет, не имеющие в анамнезе выявленных заболеваний суставов, мышц ног и спины, переломов конечностей, черепно-мозговых травм, каких-либо вестибулопатий, косоглазия. В первой части исследования участвовало 16 добровольцев, во второй – 25, в третьей – 24. Условия наблюдения исключали курение перед наблюдением, чувство голода или жажды, некомфортные биологические состояния. Испытуемые не являлись профессиональными спортсменами. Наблюдение проводилось в стандартизованных условиях, после подписания участниками добровольного информированного согласия и

прохождения инструктажа.

Первая часть исследования была направлена на изучение параметров контроля обычной вертикальной позы и «гибридной позы» (в экзоскелете). Проводилась в одну серию, после инструктажа и предварительного обучения управлению экзоскелетом. Вначале испытуемый по инструкции удерживал вертикальную позу с открытыми и закрытыми глазами, по 30 секунд. Далее – по 30 секунд, 2 варианта «гибридных поз». Отличие здесь – разный угол между бедром и голенью испытуемого, в 140 и в 90 градусов. После каждого этапа – минутный отдых.

Во второй части изучались параметры моторного контроля добровольцев при выполнении двигательного-когнитивной задачи с помощью малоамплитудных движений руки. Испытуемый располагался сидя перед экраном зрительной обратной связи, локоть находился на столе в заданном положении, кисть обхватывала статичную рукоятку (силовой джойстик – рисунок 1, часть слева). Требовалось по инструкции надавливать на рукоятку для перемещения метки центра давления с силой не менее 10 Н. Задача – перевести из центра и удержать метку центра давления на появляющейся «мишени» до её исчезновения, вернуться в центр. Длительность пробы – 60 секунд. Для реализации процедуры использовался стандартный тест «Динамическая проба» в штатной программе STPL. После инструктажа и ознакомительного теста, наблюдение проводилось ежедневно в течение последующих 4 дней, в первой половине дня. Один сеанс состоял из 3 одинаковых последовательных тестов для каждой руки (всего 6 тестов для обеих рук), с минутным отдыхом в промежутках.

В третьей части исследования реализовывалась комплексная процедура, включающая в себя выполнение инструкции в пассивном экзоскелете нижних конечностей, управление с помощью силового джойстика – рисунок 1, часть справа.

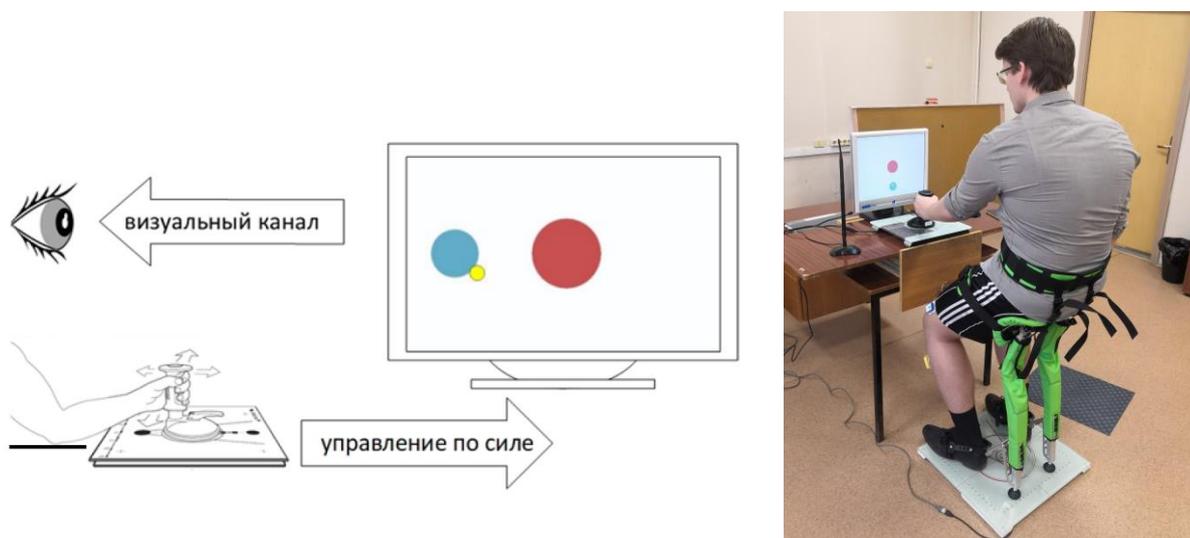


Рисунок 1. Общий принцип организации теста с силовым джойстиком (слева) и выполнение теста в пассивном экзоскелете нижних конечностей (справа)

Наблюдение проводилось в одну серию, после предварительного обучения управлению экзоскелетом и джойстиком, необходимой подготовки. Процедура включала два блока последовательных заданий, где первый блок – этапы с 1 по 5, выполнялся испытуемым без экзоскелета, а второй – этапы с 6 по 10, в экзоскелете, рисунок 2.

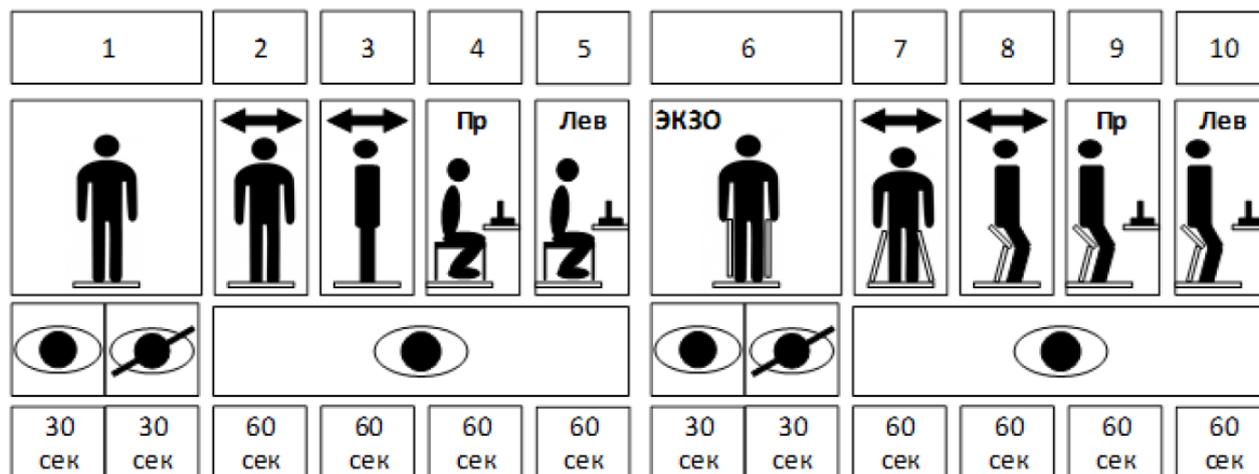


Рисунок 2. Общая схема процедуры наблюдения. «Пр» – правая рука, «Лев» - левая рука, «ЭКЗО» - экзоскелет, «сек» - длительность этапа в секундах.

Первый этап включал 2 фазы – обычное стояние добровольца в вертикальной позе, голова прямо, руки свободно вдоль туловища, с открытыми и закрытыми глазами, по 30 секунд. На втором этапе доброволец под звук метронома раскачивался во фронтальной плоскости (с правой ноги на левую) без отрыва ступней от платформы. Требовалось производить максимально комфортные для испытуемого по амплитуде и точные в ответ на звук движения в задаваемом метрономом медленном ритме 45 ударов в минуту (0.75 Гц). Третий этап – похож на второй, но движения выполнялись в сагиттальной плоскости (вперёд – назад). На четвёртом и пятом этапах производилось поочередное управление силовым джойстиком правой и левой рукой из положения сидя на четырёхном табурете, установленном на силовую платформу. С шестого по десятый этап последовательно выполнялись действия сходные этапам с первого по пятый, но в экзоскелете. Угол сгиба ног испытуемого в экзоскелете составлял 120 градусов. Длительность каждого этапа и отдых между этапами составляли 1 минуту.

Статистический анализ полученных данных включал: проверку типа распределения с помощью одновыборочного критерия типа Колмогорова Смирнова, оценку различий между парными выборками – критерий Уилкоксона, непараметрический аналог ANOVA – критерий Фридмана, корреляционный анализ по методу ранговой корреляции Спирмена, оценку различий между независимыми выборками – U критерий Манна Уитни, также использовался критерий Фишера при проведении однофакторного дисперсионного анализа, апостериорный тест Бонферрони.

Результаты и обсуждение

Характеристики баланса тела добровольцев по электрической активности мышц нижних конечностей и показателям стабиллометрии. Формирование «гибридной позы» у человека связано с заменой естественной синергии мышц ног (например, передней большеберцовой, камбаловидной и двуглавой мышцы бедра) на «искусственную» с существенной модификацией паттерна движения и значительными адаптационными перестройками механизмов пострурального контроля. Во время изучения электрической активности мышц получены значения площадей интегральных огибающих электромиограмм свободной вертикальной позы в фазе с открытыми глазами относительно которых проводились дальнейшие сравнения, в мкВ·с: MQF (левая) (Me = 529, Q1 = 290, Q3 = 2818), MQF (правая) (Me = 481, Q1 = 277, Q3 = 2858), МТА (левая) (Me = 417, Q1 = 365, Q3 = 659), МТА (правая) (Me = 463, Q1 = 382, Q3 = 542). Значения показателя ЭМГ в «гибридной позе» – рисунок 3.

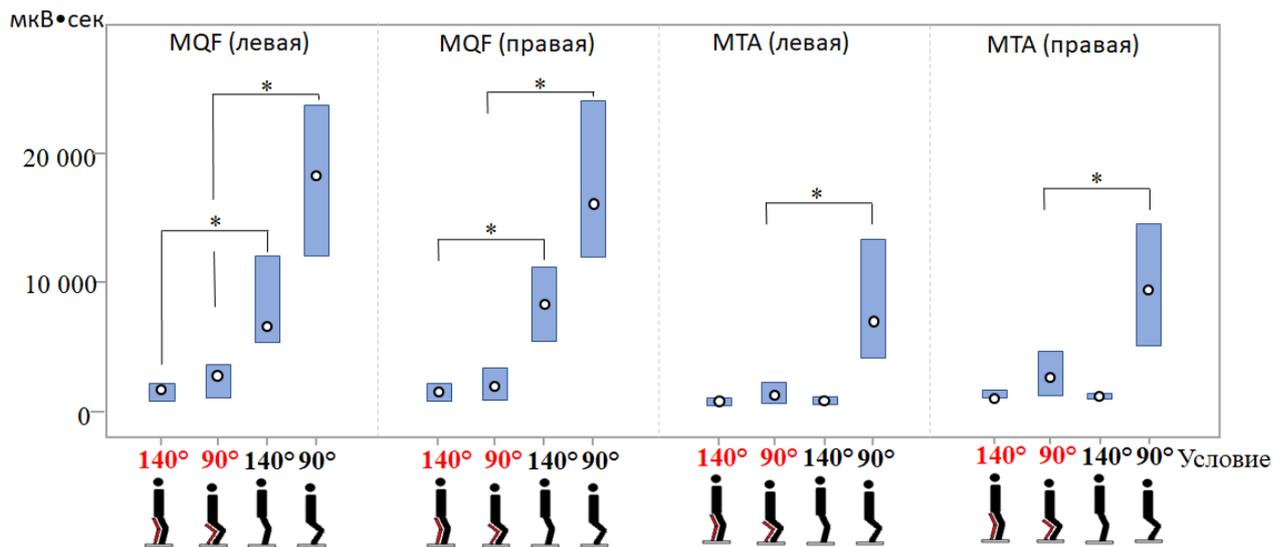


Рисунок 3. Площади интегральных огибающих электромиограмм мышц в «гибридной» позе с вариантами наклона в коленном суставе (140 и 90 градусов) в естественных условиях и в экзоскелете (красный цвет). * - достоверное увеличение показателя в приседе по сравнению с «гибридной позой»; $p < 0.05$.

При использовании экзоскелета («гибридная поза») в высоком и низком приседах повышалась активность передних большеберцовых мышц в сравнении активностью в обычной вертикальной позе: в высоком приседе показатель вырос в 2,5 раза ($p = 0.005$), и в 1,5 раза ($p = 0.021$) соответственно в левой и правой ноге. В низком приседе площадь интегральной огибающей выросла в 2,8 раза ($p = 0.002$) и в 4,6 раза ($p = 0.007$) соответственно в левой и правой ноге. При этом для мышц квадрицепса бедра различий установлено не было. Подтверждены и дополнены выводы, сформулированные Collins с соавторами [2015] о повышенной активации передних большеберцовых мышц при использовании устройств с высокой жёсткостью, призванных ослабить нагрузку на икроножные мышцы.

Проводилось аналогичное сравнение показателей ЭМГ «гибридной позы» с аналогичными им по геометрии позициям испытуемых без экзоскелета. Значительно снижалось напряжение мышц при использовании экзоскелета в высоком приседе. Продемонстрировано значительное снижение активности исследуемых мышц при использовании экзоскелета, что свидетельствует о выполнении основного назначения устройства – снижение нагрузки на опорно-двигательный аппарат. Сравнение опорных реакций (мощности статокинезограммы, в мДж/с) между свободной вертикальной позой ($Me = 32, Q1 = 26, Q3 = 44$) и «гибридной позой» ($Me=41, Q1=33, Q3=122$) продемонстрировало ухудшение качества постурального контроля при использовании экзоскелета в высоком приседе на 27% ($p = 0.011$) и в низком приседе на 69% ($p = 0.011$). Однако, в высоком приседе без экзоскелета мощность статокинезограммы увеличилась в 5 раз ($p < 0.001$). Наибольшие различия наблюдались в сравнении с низким приседом без устройства ($Me=680, Q1=362, Q3=988$), достигая разницы в 22 раза ($p < 0.001$). Между показателями для вариаций «гибридных поз» здесь различий выявлено не было ($p = 0.248$).

Данное наблюдение в статичных позах может играть роль «базового» в изучении моторного контроля человека в пассивных или активных экзоскелетах.

Характеристики управляющих малоамплитудных движений рук и быстроедействие выполнения инструкции из положения сидя. Во второй части изучались особенности регуляции изометрических движений при управлении силовым джойстиком.

Изменение быстрогодействия между тестами. Быстроедействие оценивалось по среднему времени отработки одной «мишени» за время теста (T_r, c), которое варьировалось от 0.5 до 3.0 секунд. Сравнивались значения быстрогодействия внутри сеансов (по 3 теста). Различия получены для левой руки в 3-м сеансе ($\chi^2 = 33, p < 0.001$) и 4-м сеансе ($\chi^2 = 34, p < 0.001$), для правой руки в 4-м ($\chi^2 = 7, p = 0.029$) сеансе. Проводилась оценка динамики в течение последовательных сеансов. Сравнивались результаты с 1-м тестом 1-го сеанса соответствующей руки – рисунок 4. В течение первых двух сеансов наблюдалось улучшение показателей выполнения теста, оптимизируясь к 3-ему сеансу.

Сила вертикального давления рукой на джойстик. Аналогично, сравнивались значения силы надавливания для всех 12 тестов. Анализировались значения внутри сеансов (по 3 теста). Различия получены в каждом сеансе каждой руки: для левой руки в 1-м ($\chi^2 = 7, p = 0.030$), в 2-м ($\chi^2 = 10, p = 0.008$), в 3-м ($\chi^2 = 8, p = 0.020$) и 4-м ($\chi^2 = 13, p = 0.002$) сеансах; для правой руки в 1-м ($\chi^2 = 9, p = 0.009$), в 2-м ($\chi^2 = 27, p < 0.001$), в 3-м ($\chi^2 = 15, p = 0.001$) и 4-м ($\chi^2 = 11, p = 0.005$) сеансе.

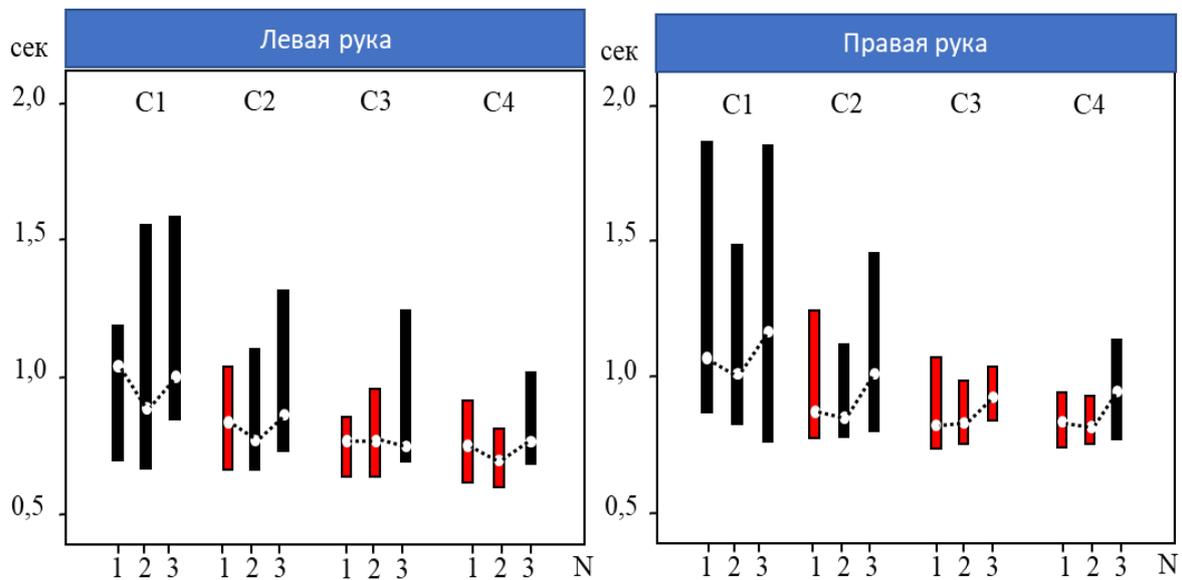


Рисунок 4. Изменение быстрействия (сек) между тестами в сеансах (С) для левой и правой руки. Красные столбцы показывают достоверное снижение быстрействия по сравнению с первым тестом первого сеанса соответствующей руки; $p < 0.05$. N – порядковые номера выполнения теста.

На рисунке 5 представлены результаты сравнения внутри одного сеанса, относительно 1-го теста.

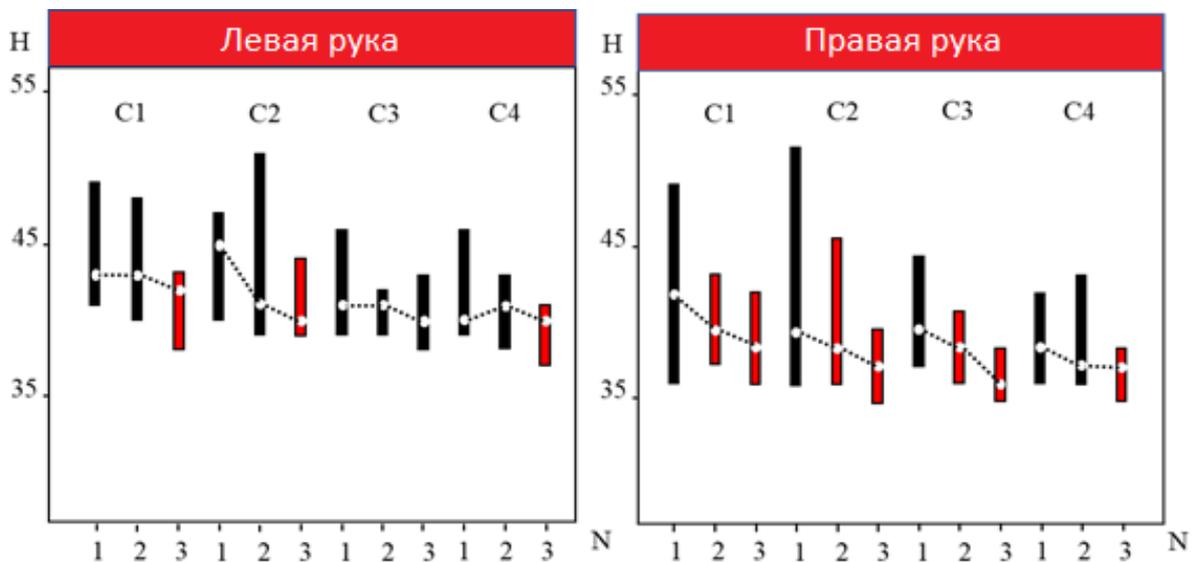


Рисунок 5. Изменение силы вертикального давления (в Ньютонах – Н) рукой на джойстик между тестами в сеансах (С) для левой и правой руки. Красные столбцы – достоверное снижение силы давления по сравнению с первым тестом первого сеанса соответствующей руки; $p < 0.05$. N - порядковые номера выполнения теста.

Сила надавливания на джойстик от сеанса к сеансу уменьшалась, что может свидетельствовать о подборе оптимальных мышечных усилий, достаточных для эффективного выполнения задачи.

Качество целенаправленного движения рук в плоскости опоры. Проведено сравнение

критерия энергоэффективности (мДж/сек) управления внутри каждого отдельно взятого сеанса (по 3 теста). Для левой руки в 3-м ($\chi^2 = 6$, $p=0.042$) сеансе; для правой руки в 1-м ($\chi^2 = 8$, $p=0.022$), в 2-м ($\chi^2 = 17$, $p<0.001$), в 3-м ($\chi^2 = 10$, $p=0.008$) и 4-м ($\chi^2 = 10$, $p=0.007$) сеансе. На рисунке 6 представлены результаты сравнения внутри одного сеанса, относительно 1-го теста.

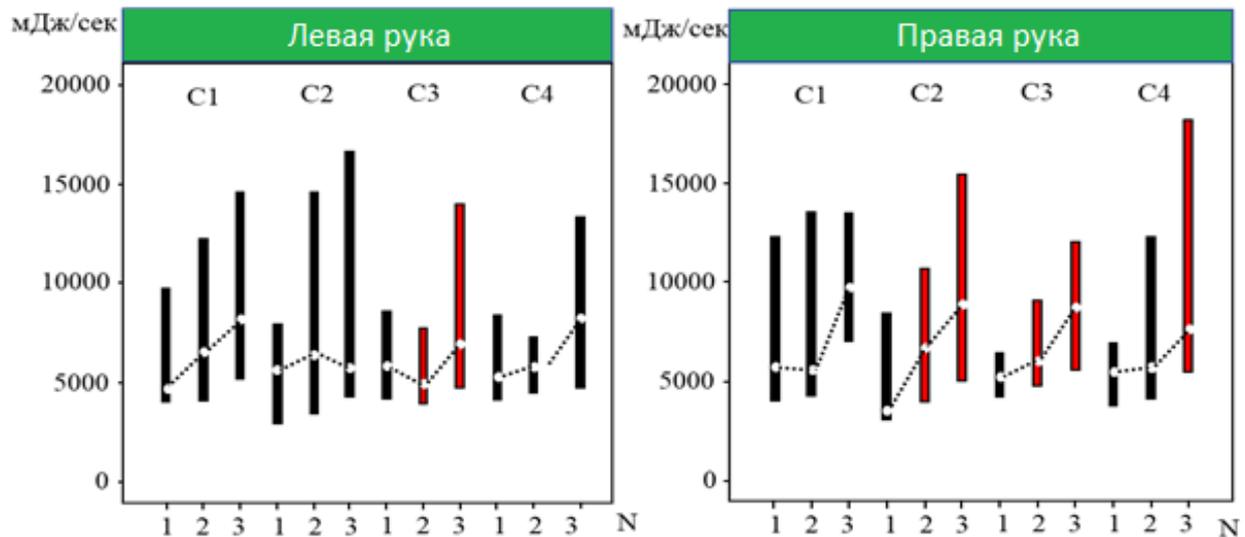


Рисунок 6. Изменение критерия энергоэффективности управления (мДж/сек.) между тестами в сеансах (С) для левой и правой руки. Красные столбцы показывают достоверное увеличение показателя по сравнению с тестом 1 сеанса 1 соответствующей руки; $p < 0.05$.

Увеличение критерия энергоэффективности управления джойстиком свидетельствует о более активном манипулировании для отработки большего количества мишеней. Наибольшее значение показателя наблюдалось для правой, ведущей руки (по сравнению с левой).

Обобщенная динамика максимальной амплитуды ЭМГ исследуемых мышц добровольцев при обхвате рукоятки (“сжатие”) в последовательных сеансах. Получена динамика максимальной амплитуды ЭМГ исследуемых мышц добровольцев при обхвате рукоятки (“сжатие”) в последовательных сеансах. Для поверхностного сгибателя пальцев правой руки различия максимальной амплитуды наблюдались только между 1 и 2 целевыми сеансами – снижение, $p = 0.006$. Аналогично и для левой руки, $p = 0.04$. Наиболее отчетливые изменения происходили после первого целевого сеанса. Для разгибателя пальцев различия максимальной амплитуды были только для правой руки в 3-м сеансе относительно 2-го: уменьшение показателя ($p = 0.017$). Для короткого сгибателя большого пальца кисти – получены различия для левой и правой руки во 2-ом сеансе относительно 1-го, наблюдалось уменьшение показателя ($p = 0.015$ и $p = 0.025$ соответственно); между сеансами 4 и 3: увеличение показателя ($p = 0.035$). Для длинного разгибателя большого пальца – получены значимые различия только для правой руки во 2-ом сеансе относительно 1-го: уменьшение

показателя ($p = 0.009$). В течении первых трёх сеансов максимальная амплитуда ЭМГ исследуемых мышц руки уменьшалась. При этом, наибольшие изменения характерны для мышц-сгибателей.

Характеристики баланса тела и управляющих усилий верхних конечностей в пассивном экзоскелете нижних конечностей, в различных позициях. Распределение добровольцев по вкладу зрения в контроль заданной позы (стабилометрия). Анализировался показатель опорной реакции «мощность статокинезиограммы» для оценки стабильности вертикальной позы. В спокойном вертикальном стоянии с открытыми глазами показатель мощности статокинезиограммы варьировался от 32 до 99 мДж/сек, и от 67 до 146 мДж/сек при закрытии глаз. Оценив качество вертикальной позы у всех испытуемых, были выделены две группы – кто более устойчив с закрытыми глазами и кто менее, где границей была медиана соотношения мощности статокинезиограммы для фаз закрытых глаз к открытым – условно «критерий сенсорного профиля». Изменение значений мощности статокинезиограммы при закрытии глаз по сравнению с фазой с открытыми глазами варьировалось от -3% до 346%, что демонстрировало наличие в группе таких испытуемых, у которых при закрытых глазах снижались значения мощности статокинезиограммы (Р), то есть, устойчивость позы не ухудшалась. Таким образом, выделены 2 условные группы по 8 испытуемых, где границей была медиана значений 52%. Испытуемые с показателями больше медианы (выраженный зрительный контроль) отнесены к подгруппе, условно названной «визуалы» ($Me = 143, Q1 = 76, Q3 = 290$), ниже медианы – к подгруппе «проприоцептики» ($Me = 17, Q1 = -7, Q3 = 16$). При этом не было выявлено никаких корреляций показателя ЭМГ с критерием сенсорного профиля. Таким образом, площадь интегральной огибающей не отображала какие-либо особенности, связанные с выделенными подгруппами, и не была связана с качеством поддержания обычной вертикальной позы по показателям стабилометрии.

Проводилось аналогичное сравнение критерия сенсорного профиля при облачении в экзоскелет. При использовании экзоскелета показатель варьировался от 33 до 103 мДж/сек с открытыми глазами; с закрытыми глазами – от 41 до 144 мДж/сек. «Критерий сенсорного профиля» в экзоскелете изменялся от -52% до 268%. Медиана групповых значений составляла 64%. Проводилось распределение испытуемых аналогично ранее описанной методике: «проприоцептики-Э» ($Me = -26, Q1 = -44, Q3 = -15$), и «визуалы-Э» ($Me = 109, Q1 = 88, Q3 = 164$). Произведено деление на подгруппы с большим и меньшим вкладом зрительного контроля на поддержание равновесия в обычном вертикальном стоянии. При аналогичном методе деления на подгруппы в экзоскелете у 79% испытуемых при экипировке в экзоскелет не произошло перехода из одной подгруппы в другую. Таким образом, было принято, что вся выборка испытуемых преимущественно сохраняла исходную оценку

«сенсорного профиля» и при использовании экзоскелета. В этой связи, далее в описании применялось деление на подгруппы «проприоцептики» и «визуалы» по показателям этапа со свободной вертикальной позой без экзоскелета.

Сравнивались показатели в каждой из подгрупп между этапами со свободной вертикальной позой, высоким и низким приседами в «гибридной позе» соответственно. У испытуемых с более выраженным зрительным контролем («визуалы») установлены различия ($\chi^2 = 7.7$, $p=0.021$) в рассматриваемых этапах. Попарное сравнение продемонстрировало увеличение мощности статокинезиограммы на 70% у «визуалов» в низком приседе в «гибридной позе» по сравнению с обычной вертикальной позой ($p=0.017$). У подгруппы «проприоцептики» отличия отсутствуют ($\chi^2 = 2.7$, $p=0.250$). При этом в подгруппе «проприоцептики» в «гибридной позе» в низком приседе мощность статокинезиограммы меньше, чем в подгруппе «визуалы» ($p=0.014$). Отдельно численно показаны различия между мощностью статокинезиограммы «проприоцептиков» и «визуалов», которые явно показывают зависимость, связанную с вкладом зрения на поддержание «гибридной позы» в низком приседе: $Me = 39$, $Q1 = 29$, $Q3 = 63$ у «проприоцептиков» по сравнению с «визуалами» $Me = 94$, $Q1 = 57$, $Q3 = 193$.

Разделение на группы, которые для простоты были названы «визуалы» и «проприоцептики», может продемонстрировать разную эффективность применения устройств для поддержания «гибридной позы». Поскольку до сих пор остаётся актуальной проблема дифференциации вклада отдельных сенсорных компонентов в регуляцию позы и поддержания равновесия, была предпринята попытка изучить, как меняется регуляция позы в новых, изменённых условиях исходя из вовлеченности зрительной системы (более, или менее выраженный зрительный контроль). Так как человек не использует в чистом виде только проприоцептивную, или только визуальную системы, а сочетание их работы, то предполагается, что такое условное разделение на подгруппы, характеризующееся преобладанием влияния одной, может продемонстрировать различия в двигательных стереотипах. Поскольку выборка состояла из условно здоровых добровольцев, предполагается, что такое разделение предполагается допустимым. В то время как метод оценки площади интегральных огибающих электромиограмм не дал каких-либо различий, метод стабиллометрии позволил выявить взаимосвязь стабильности поддержания «гибридной позы» в пассивном экзоскелете с сенсорным обеспечением свободной вертикальной позы, что позволяет расширить применение физиологических методов в исследованиях позной регуляции.

Контроль позы при ритмичном раскачивании во фронтальной и сагиттальной плоскости (стабиллометрия). Анализировались значения стабиллометрических показателей и ЭМГ при ритмичном раскачивании во фронтальной и сагиттальной плоскостях в обычной

вертикальной позе и в «гибридной». В предположении, что раскачивание из «гибридной позы» может снижать ощущение безопасности, добровольцам была дана инструкция «выполнять движения в безопасном для себя режиме». В сагиттальной проекции мощность статокинезиограммы в «гибридной позе» уменьшалась, а во фронтальной проекции увеличивалась (рисунок 7).

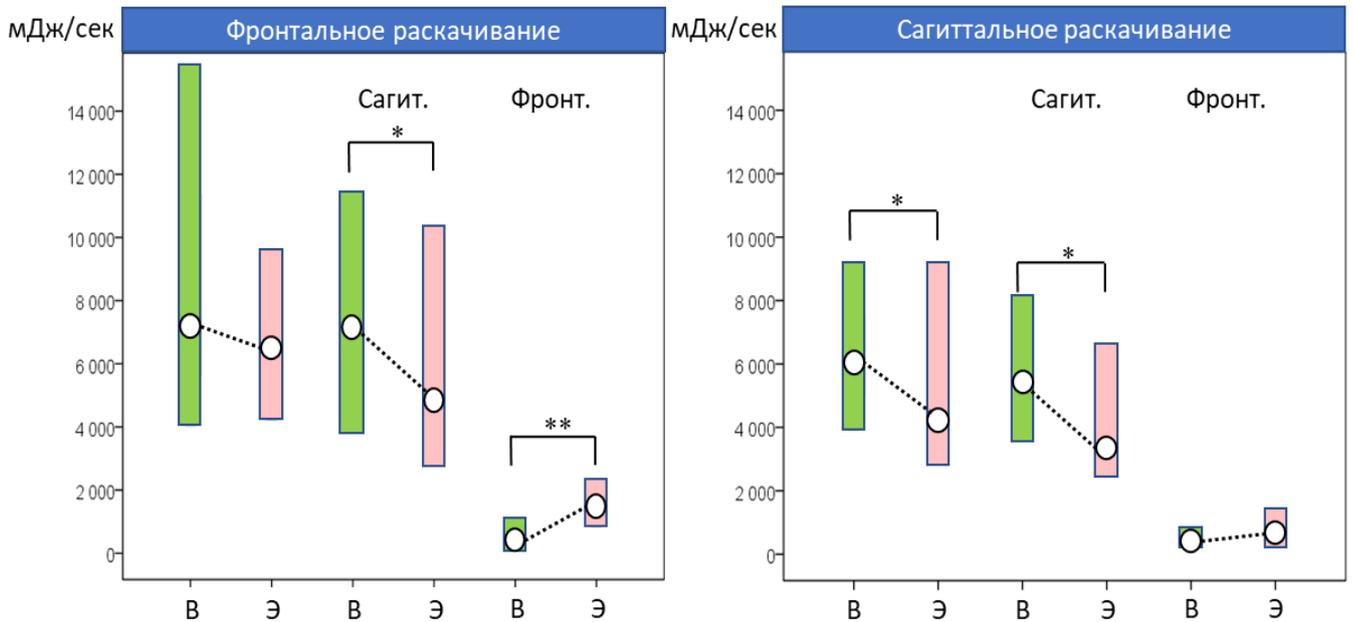


Рисунок 7. Мощность статокинезиограммы (мДж/сек) раскачивания во фронтальной и сагиттальной плоскостях в вертикальной позе (В) и в экзоскелете (Э) полная, в сагиттальной (сагит.) и фронтальной (фронт.) проекциях. * - достоверное снижение и ** - достоверное увеличение мощности статокинезиограммы в экзоскелете по сравнению с вертикальной позе, ** - ; $p < 0.05$.

В «гибридной позе» при сагиттальном раскачивании мощность статокинезиограммы была меньше, что, полагаем, соответствовало более скоординированному движению. Наибольшие изменения были характерны для движений в сагиттальной проекции при использовании экзоскелета – показатель меньше на 30%, в то время как различия во фронтальной плоскости отсутствовали.

Полученные результаты могут свидетельствовать о реализации двигательной программы, связанной с изменённым количеством степеней свободы движений во время использования экзоскелета. При этом различий между «визуалами» и «проприоцептиками» здесь не было выявлено.

Во время поддержания «гибридной позы» в экзоскелете максимальная амплитуда движений во фронтальной плоскости уменьшилась на 19% ($p = 0.007$), в то время как в сагиттальной плоскости увеличилась на 6% ($p = 0.007$).

Оценены площади статокинезиограмм, характеризующие диапазоны движений, в «гибридной позе» и в обычной вертикальной позе в подгруппах (таблица 1).

Таблица 1. Результаты сравнения площадей статокинезиограмм (мм²) между подгруппами «визуалы» и «проприоцептики» в этапах с раскачиванием в обычной вертикальной позе и в «гибридной позе» во фронтальной и сагиттальной плоскостях.

Раскачивание	Поза	подгруппа	S, мм ² (Me; Q1; Q3)	p (сравнение с подгруппой "визуалы")
Фронтальное	Свободная вертикальная	визуалы	5165; 3992; 8943	0.160
		проприоцептики	8778; 6310; 10654	
	Гибридная	визуалы	4580; 3530; 9488	0.024
		проприоцептики	9201; 6628; 11842	
Сагиттальное	Свободная вертикальная	визуалы	5035; 3937; 7558	0.060
		проприоцептики	7365; 4942; 9080	
	Гибридная	визуалы	3797; 2850; 9402	0.006
		проприоцептики	5403; 4193; 8120	

Отметим, что различия между подгруппами при раскачивании тела в свободной вертикальной позе отсутствовали, что свидетельствовало об одинаковой степени свободы движений и отсутствии влияния доминирующего сенсомоторного типа. Однако, при облачении в экзоскелет (в «гибридной позе») площадь статокинезиограммы во фронтальной плоскости была меньше, а в сагиттальной больше. Таким образом, принимаемая поза и ограничение движений в плоскостях влияло на величину свободного целенаправленного перемещения, что явно диктовалось элементами конструкции экзоскелета. При этом, в подгруппе «визуалы» площадь статокинезиограммы была меньше в 2 раза, чем у подгруппы «проприоцептики».

Несмотря на различия в качестве и площади движения центра давления у «проприоцептиков» и «визуалов», напряжение мышц оставалось одинаковым и не зависело от роли зрения во время поддержания вертикальной позы.

Наблюдаемое изменение активности мышц и перераспределение нагрузки в «гибридных позах», полагаем, было связано со свойствами экзоскелета. Форма экзоскелета, заданные углы поддержки ног и другие характеристики устройства оказывали влияние на способы компенсации человеком возникающих влияний, в частности, чувствительность сенсорных систем. Наблюдаемые изменения, отчасти, могут подтверждаться выводами Veneman с соавторами [Veneman et al., 2013] о возникновении общих системных возмущений, вызванных низкой согласованностью движений между пользователем экзоскелета и конструктивными особенностями устройства на первых этапах использования. Как отмечал ранее Bingham с соавторами [Bingham JT. et al., 2011], один тип

физиологических показателей часто не способен точно описать работу исследуемой системы в регуляции позы. В данном исследовании показано, что применявшиеся данные электромиографии не отображают какие-либо специфические изменения, связанные с влиянием зрительного контроля на качество поддержания обычной вертикальной позы. В то время как напряжение мышц у добровольцев оставалось практически неизменным, фактическое качество поддержания позы (по показателям опорных реакций, которые по своей сути отображали общую (интегральную) характеристику регуляции позы), зависело от особенностей сенсорного обеспечения свободной вертикальной позы.

Быстродействие – целенаправленные нажатия рукой на табурете и в экзоскелете.

Исследовалась степень выполнения инструкции (быстродействие) в двигательной задаче с визуальной обратной связью сидя на табурете и в экзоскелете с использованием силового джойстика. Поскольку движение управляющей рукой может вносить корректировку в поддержание позы испытуемым, в проведенном исследовании можно рассматривать единый фактор «поза при манипулировании», состоящий из двух ранее обозначенных факторов: со стороны манипулирования силовым джойстиком и позой добровольца на табурете или в экзоскелете. Полагаем, это важно учитывать в контексте манипулирования левой рукой, «не ведущей» для добровольцев рукой, поскольку такая непривычная деятельность могла приводить к «перегрузке» сенсомоторной системы управления движениями при сочетании как манипулирования, так и нахождения в «гибридной позе».

Поскольку показатели: силы давления, быстродействие, критерий энергоэффективности управления, имели вид нормального распределения, была проведена проверка возможности использования однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) по фактору «поза при манипулировании» (Таблица 2).

Таблица 2. Медианы и квартили силы давления, критерия энергоэффективности управления и быстродействия для правой и левой руки сидя на табурете и в экзоскелете. КЭУ - критерий энергоэффективности управления, Тр – быстродействие, «Пр» – правая рука, «Лев» - левая рука, L - уровень значимости по критерию Левиня, F - критерий Фишера, p - уровень значимости различий.

Показатель	На табурете		В экзоскелете		L	F	p
	Лев. Рука	Пр. рука	Лев. рука	Пр. рука			
Сила (Н)	23 (18; 26)	21 (16; 27)	20 (17; 28)	21 (18; 27)	0.409	0.376	0.771
КЭУ (мДж/сек)	3606 (2921; 4613)	4093 (3037; 4696)	4898 (3774; 6116)	4533 (3330; 5573)	0.430	3.288	0.024
Тр (сек)	0.91 (0.85; 1.09)	0.93 (0.82; 1.14)	0.88 (0.81; 1.20)	0.96 (0.87; 1.12)	0.205	0.477	0.699

Поскольку влияние обобщенного фактора «поза при манипулировании» оказалось не значимо для силы давления и быстродействия (таблица 2, р), дальнейшее сравнение значений по этим показателям не производилось. В то же время, «поза при манипулировании» оказала значимый эффект на критерий энергоэффективности управления ($p = 0.024$).

При управлении левой рукой в экзоскелете среднее значение критерия энергоэффективности управления увеличилось с 3940 мДж/сек до 4643 мДж/сек ($p = 0.048$) по сравнению с управлением левой рукой сидя на табурете. Результаты сравнения показывают, что управление джойстиком левой рукой в экзоскелете менее скоординировано по сравнению с управлением сидя на табурете. Следует отметить, что несмотря на то, что различие не значимо при сравнении этапов в экзоскелете и сидя на табурете, наблюдается увеличение критерия энергоэффективности управления ($p = 0.059$) между управлением правой рукой на табурете и левой рукой в экзоскелете, что косвенно подтверждает предположение о чрезмерной нагрузке на сенсомоторную систему человека при манипулировании в «гибридной позе».

Однако, время выполнения инструкции и сила давления на джойстик сидя на табурете и в экзоскелете одинаковые. Это свидетельствует о том, что результат целенаправленной деятельности (например, при выполнении задач обеими руками) в меньшей степени подвержен обнаруженному явлению. Более того, этот результат согласуется с результатами второй части исследования: оптимизация двигательного усилия при выполнении новой для добровольца деятельности сопровождается постепенной стабилизацией двигательного и мышечного усилия.

При поддержании «гибридной позы» позные автоматизмы, связанные с закрепленным представлением о конфигурации тела в пространстве, не могут быть выполнены. Возникает необходимость построения новой внутренней модели, способной эффективно обеспечивать целенаправленные движения [Ivanenko Y., Gurfinkel V., 2018]. Возможно, происходит адаптация уже существующих моторных навыков к новым условиям [Stockinger C. et al., 2014]. Однако, наличие большого количества афферентной информации от множества источников приводит к проблеме её обработки в сочетании с проблемой «моторной избыточности» [Latash M.L. et al., 2010]. Учитывая особенности индивидуального «сенсорного профиля» человека с преобладанием одной сенсорной системы над другой, построение внутренних моделей (вариант – функциональных систем) управления позой может различаться между собой в зависимости от вклада проприоцептивной афферентации. Обсуждаемые здесь полученные результаты, отчасти демонстрируют такие различия во внутренних моделях.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что исходные соотношения сенсорных систем оказывают влияние на организацию движений и позы человека в случае искусственного ограничения подвижности нижних конечностей.

2. Выявлена взаимосвязь стабильности поддержания «гибридной позы» в пассивном экзоскелете с сенсорным обеспечением свободной вертикальной позы, проявляющаяся в лучшем моторном контроле в статичном положении и при целенаправленном раскачивании тела у добровольцев с преимущественно проприоцептивной ведущей афферентацией.

3. При повторении целенаправленных движений рук происходит оптимизация управления, выраженная в росте быстродействия за счёт коррекции силы нажатия на силовой джойстик, сопровождающаяся перераспределением активностей мышц сгибателей (*musculus flexor digitorum superficialis*, *musculus flexor pollicis brevis*) и разгибателей (*musculus extensor digitorum*, *musculus ex-tensor pollicis longus*).

4. Система контроля «гибридной позы» отличается от поддержания обычной позы сидя необходимостью более выраженной корректировки положения центра масс человека, что проявляется в увеличении мощности статокинезиограммы и увеличении напряжения *musculus quadriceps femoris*.

5. Установлено, что успешность достижения результата целенаправленного движения руки одинакова в положении сидя и в «гибридной позе», однако во втором случае движение характеризуется более сложной траекторией прикладываемой силы, выраженной в повышении мощности сатокинезиограммы.

6. В «гибридной позе» у испытуемого обеспечение целенаправленного движения руки характеризуется повышением напряжения ипсиалатеральной *musculus tibialis anterior* и контрлатеральной *musculus quadriceps femoris*, в отличие от обычной позы сидя.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации по теме диссертации согласно критериям, указанным в п.11-13 постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», и в изданиях согласно Приказу Министерства образования и науки РФ от 26.09.2022 № 1690 «Об утверждении правил формирования перечня рецензируемых научных изданий...», без учёта переводных версий статей из журналов «Физиология человека» и «Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова»

В журналах, входящих в базу данных RSCI на платформе Web of Science

1. Джелдубаева Э.Р., Бирюкова Е.А., Махин С.А., **Бабанов Н.Д.**, Чуян Е.Н., Кубряк О.В. Максимальная амплитуда электромиограмм сгибателей и разгибателей рук в серии сеансов управления силовым джойстиком у здоровых добровольцев // *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова.* – 2020. – Т. 106. – №. 1. – С. 44–54.
2. **Бабанов Н.Д.**, Бирюкова Е.А., Джелдубаева Э.Р., Махин С.А., Чуян Е.Н., Кубряк О.В. Динамика параметров малоамплитудных движений рук при повторяющейся двигательной когнитивной задаче // *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова.* – 2020. – Т. 106. – №. 11. – С. 1370–1384-1370–1384.
3. **Бабанов Н. Д.**, Бирюкова Е.А. Нейрофизиологическое обеспечение моторного контроля в «гибридных» позах. Обзор литературы // *Сенсорные системы.* — 2021 – 2 – с. 91-102

В журналах, входящих в базу данных Scopus

4. **Бабанов Н. Д.**, Кубряк О. В. Физиологические методики в изучении «пассивных» промышленных экзоскелетов спины и нижних конечностей // *Медицина труда и промышленная экология.* – 2020. – №. 5. – С. 318-328.
5. **Бабанов Н.Д.**, Меркурьев И.В., Кубряк О.В. Баланс тела человека в «гибридных позах» между стоянием и сидением в пассивном экзоскелете нижних конечностей. // *Физиология человека.* – 2021 – Т. 47 - № 4 – С. 58 - 67.

В журналах «списка ВАК» по направлению 1.5.5 – Физиология человека и животных

6. Чуян Е. Н., Бирюкова Е. А., **Бабанов Н. Д.** Двигательная реабилитация пациентов с нарушениями моторики верхних конечностей: анализ современного состояния исследований (обзор литературы) // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия.* – 2019. – Т. 5. – №. 1.

Патент

7. *Патент* 2725055 Российская Федерация, А61В 5/22 (2020.01); А61В 5/0488 (2020.01). Способ комплексной оценки функции верхних конечностей. / Бирюкова Е.А., Джелдубаева Э.Р., Чуян Е.Н., Кубряк О.В., **Бабанов Н.Д.**; №2019119062; заявл. 18.06.2019; опубл. 29.06.2020, Бюл. № 19 – 16 с.

Другие публикации по теме диссертационной работы**В рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК**

8. **Бабанов Н. Д.**, Каленова А. А., Серченко Я. А., Гроховский С. С., Кубряк О. В. Стандартизация, взаимозаменяемость и анализ предложений стабиллоплатформ в России // *Проблемы стандартизации в здравоохранении*. – 2019. – №. 9-10.

9. Мощенко М. Г., Егоров Г. П., **Бабанов Н. Д.**, Кубряк О. В. Пассивный экзоскелет нижних конечностей человека и облегченный протокол оценки физиологической эффективности // *Динамика сложных систем-XXI век*. – 2019. – Т. 13. – №. 4. – С. 23-28.

Учебное пособие

10. «Силовые платформы (стабиллоплатформы) в оценке регуляции вертикальной позы человека и восстановлении функции равновесия». Учебно-методическое пособие: Герасименко М.Ю., Евстигнеева И.С., Кубряк О.В., **Бабанов Н.Д.**, Фролов Д.В., Еремушкин М.А, Михалева А.В.. – М.: ФГБОУ ДПО РМАНПО, – 2020 – 46 с. ISBN 978-5-7249-3218-9.

Материалы конференций

11. **Бабанов Н. Д.**, Кубряк О. В. Признаки изменения состояний человека в динамике конфигурации электромиографических параметров // *Управление движением Motor Control 2020*. – 2020. – С. 34-35.

12. **Бабанов Н.Д.** Динамика ЭМГ-показателей человека при различных позах в экзоскелете нижних конечностей. Трансляционная медицина: возможное и реальное, ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России Москва, 2020, С. 40-41.

13. **Бабанов Н. Д.**, Бирюкова Е. А., Юкало Е. В. Влияние управляющих воздействий рукой на силовой джойстик в серии малоамплитудных движений // *Трансляционная медицина: возможное и реальное*. — ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России Москва, 2020. — С. 41–42.

14. **Бабанов Н.Д.**, Кубряк О.В. Оценка управления балансом тела в промышленном экзоскелете нижних конечностей. XIV Всероссийская (с международным участием) конференция «БИОМЕХАНИКА – 2020», Пермь, Россия, 3-5 декабря 2020. С.17 – 20

15. **Бабанов Н.Д.**, Бирюкова Е.А., Джелдубаева Э.Р., Касьянова Е.О., Чуян Е.Н., Кубряк О.В. Параметры малоамплитудных движений верхних конечностей здоровых испытуемых во время решения сложной двигательно-когнитивной задачи с биоуправлением . I Национальный Конгресс по когнитивным исследованиям, искусственному интеллекту и нейроинформатике, Москва, Россия, 10-16 октября 2020.

16. Махин С.А., Бирюкова Е.А., Джелдубаева Э.Р., **Бабанов Н.Д.**, Чуян Е.Н., Кубряк О.В. Оценка реактивности альфа-ритма ЭЭГ в связи с динамикой показателей биоуправления верхними конечностями в серии стабиллометрических тренировок. I Национальный Конгресс по когнитивным исследованиям, искусственному интеллекту и нейроинформатике, Москва,

Россия, 10-16 октября 2020

17. **Бабанов Н.Д.**, Кубряк О.В. Параметры моторного контроля вертикально стоящих добровольцев в пассивном экзоскелете при раскачивании. // V Всероссийская междисциплинарная конференция «Мотивационные аспекты физической активности», посвященная памяти первого ректора НовГУ В.В. Сороки. – Новгород, 2021, - С. 12-17

18. **Бабанов Н.Д.** Параметры стандартизованного ручного управления в положениях сидя и в экзоскелете нижних конечностей. // XXVII Всероссийская конференция молодых учёных с международным участием «Актуальные проблемы биомедицины – 2021». Санкт-Петербург, 2021, С. 143 – 144.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- БОС – биологическая обратная связь
- мДж/сек – миллиджоуль / секунда
- Мм – миллиметр
- Н - Ньютон
- сек - секунда
- Тр - Показатель быстродействия (секунды)
- ЦД - Центр давления
- ЦНС – центральная нервная система
- ЭМГ – электромиография
- А - интегральный параметр статокинезиограммы (Дж)
- К - Коэффициент асимметрии
- L - длина статокинезиограммы (мм)
- MQF - Musculus quadriceps femoris (четырёхглавая мышца бедра)
- МТА - Musculus tibialis anterior (передняя большеберцовая мышца)
- Р - мощность статокинезиограммы (мДж/сек)
- S - Площадь статикинезиограммы (мм²)