

ЖВАНСКИЙ

Дмитрий Сергеевич

**СОСТОЯНИЕ МЕЖКОНЕЧНОСТНЫХ СВЯЗЕЙ
ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЯХ РУК И НОГ
В НОРМЕ И ПРИ ЦЕРЕБРАЛЬНЫХ НАРУШЕНИЯХ**

03.01.09 – математическая биология, биоинформатика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Москва 2015

Работа выполнена на кафедре физики живых систем факультета биологической и медицинской физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» и в лаборатории нейробиологии моторного контроля Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук»

Научный руководитель: Кандидат биологических наук
СОЛОПОВА Ирина Александровна
(Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук»)

Официальные оппоненты: Доктор биологических наук
ПАВЛОВА Ольга Геннадиевна
(Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Российской академии наук»)

Кандидат биологических наук
МОШОНКИНА Татьяна Ромульевна
(Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физиологии им. И.П. Павлова Российской академии наук»)

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки государственный научный центр Российской Федерации «Институт медико-биологических проблем Российской академии наук»**

Защита диссертации состоится « » _____ 2015 года в _____ час. _____ мин. на заседании диссертационного совета Д 002.077.04 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук» по адресу: 127994, г. Москва, ГСП-4, Большой Каретный переулок, д. 19, стр. 1.

С текстом автореферата и диссертации можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук», а также на сайте ИППИ РАН по адресу www.iitp.ru

Автореферат разослан « » _____ 2015 года

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор биологических наук, профессор

Рожкова Г.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Изучение функциональных межконечностных связей у человека представляет собой важную и актуальную задачу физиологии движений. Известно, что регуляция ритмических движений человека основана на взаимодействии супраспинальных входов, спинальных генераторных сетей (центральные генераторы ритмики, ЦГР) и сенсорных обратных связей (Козловская, 1976; Zehr & Duysens, 2004). При этом локомоция может быть активирована нисходящими кортикальными и субкортикальными командами, которые передаются нижележащими отделами центральной нервной системы (ЦНС) к спинальным генераторным цепям, управляющим движениями рук и ног (Whelan, 1996). Локализованные на уровне спинного мозга генераторы шагательных движений могут при определенных условиях активировать шагание в отсутствие супраспинальных влияний. Существование генераторов ритмики было доказано у многих беспозвоночных, а также у большого ряда позвоночных (Grillner, 1985; Grillner & Wallen, 1985). В последнее время большинство ученых склоняется к мысли о существовании подобных генераторов у человека (Dimitrijevic et al., 1998; Gerasimenko et al., 2002, 2010; Selionov et al., 2009). Как для высших млекопитающих, так и для человека предполагается, что подобного рода генератор существует для каждого сустава.

Афферентные сигналы от движущихся при локомоции конечностей поступают в спинной мозг, информируют ЦНС о состоянии реального окружения и формируют моторный выход ЦГР. Таким образом, ЦГР можно представить как состоящий из базовых нейронных блоков, на основе взаимодействий которых можно предсказать двигательное поведение.

Обычной ходьбе человека сопутствуют хорошо скоординированные движения рук и ног. Совершение циклических движений рук, сопутствующих естественному шаганию, требует межконечностной координации, которая предполагает нейронные взаимодействия между генераторами верхних и нижних конечностей (Eke-Okoro et al., 1997; Wannier et al., 2001). Хотя существует мало прямых доказательств межконечностных связей у человека, высказывалось предположение, что элементы четвероногой межконечностной координации сохранены и у человека (Dietz, 2002). Считается, что нейронная координация и картина рефлекторной модуляции сохранилась в спинном мозге человека на люмбарном и цервикальном уровне. Было предположено, что координация рук и ног во время шагания обусловлена активностью связанных нейронных ЦГР, контролирующих движения рук и движения ног (Wannier et al., 2001). Дитц с коллегами показали, что межконечностные эффекты зависят от двигательной задачи (Dietz et al., 2001).

Большое разнообразие двигательных задач требует совместной скоординированной работы рук, но только ритмические движения активируют те двигательные синергии, которые присущи естественной локомоции с вовлечением движений рук, фазированных с движениями ног. Способом исследования координации нейронных центров ЦГР, которая, предположительно, вносит вклад в движения рук и ног, является проверка эффектов их взаимодействия во время ритмических движений.

Особую практическую значимость имеет проведение подобных исследований у пациентов с церебральными нарушениями, в первую очередь, у больных после

инсульта головного мозга. Многочисленные исследования показали, что двигательная активность после повреждения мозга играет решающую роль в нейрофизиологической реорганизации, которая может происходить в областях мозга, соседних с поврежденной областью (Cao et al., 1998; Nelles et al., 1999). У многих пациентов развивается ненормальный стереотип ходьбы, который трудно поддается исправлению (Aruin et al., 2003; Mauritz, 2004; Krasovsky & Levin, 2009). Для предотвращения его развития и более быстрого восстановления локомоторных функций используются различные системы, помогающие совершать шагательные движения (Hesse, 2008; Ivanenko et al., 2009). В остром периоде заболевания способность больных находиться в вертикальном положении ограничена, и поэтому рационально проводить двигательную реабилитацию в положении лежа на спине. Помимо воздействия на нижние конечности, также существует острая необходимость восстановления движений и в верхних конечностях. Кроме того, совместные движения верхних и нижних конечностей приводят к активации нервных центров (Huang & Ferris, 2004), управляющих сочетанными движениями рук и ног во время акта шагания, и могут способствовать облегчению выполнения двигательных задач у пациентов после инсульта (Stephenson et al., 2010).

Однако, несмотря на усилия нейрофизиологов и клиницистов, на наличие большого количества клинико-физиологических исследований, многие вопросы, касающиеся состояния функциональных связей между верхними и нижними конечностями, как в норме, так и при церебральных нарушениях, остаются не до конца изученными.

Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы было выявление специфики межконечностных связей при различной пространственно-временной организации совместных циклических движений рук и ног в положении лежа у здоровых людей и у больных с церебральными нарушениями.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Сравнение взаимных влияний верхних и нижних конечностей при их совместных движениях у здоровых обследуемых и у пациентов после инсульта.
2. Изучение влияния фазовых соотношений между движениями конечностей и внешних афферентных воздействий на степень связывания генераторов ритмики верхних и нижних конечностей у здоровых обследуемых и у пациентов после инсульта.
3. Сравнение межконечностных влияний при произвольных и пассивных движениях конечностей, инициируемых различными способами.
4. Исследование межконечностной координации у больных после инсульта при выполнении совместных движений конечностей в зависимости от сложности двигательной задачи.

Научная новизна

В диссертационной работе получены новые данные о функциональных связях между нейронными сетями, ответственными за циклические движения конечностей одного пояса. Показано, что у здоровых обследуемых связи между генераторами нижних конечностей являются более жесткими, чем между соответствующими нейронными сетями верхних конечностей. У больных функциональность связей существенно снижена.

Получены новые сведения о взаимодействиях между генераторными нейронными сетями рук и ног при циклических движениях конечностей. Показано, что влияние движений рук на моторный выход в ногах отличается от влияния с ног на руки. У здоровых обследуемых влияние с рук на ноги выражается в увеличении активности мышц ног, этот эффект не проявляется у больных. Влияние с ног на руки проявляется в уменьшении активности проксимальных мышц рук, как у здоровых обследуемых, так и у больных после инсульта.

Впервые показано, что у здоровых обследуемых движения конечностей с фазовыми соотношениями, присущими нормальной ходьбе, способствуют более сильным влияниям с рук на ноги и более выраженному проявлению афферентных влияний. У постинсультных больных активация мышц рук и ног не зависит от фазовых соотношений между движениями конечностей.

Впервые показано, что рефлекторная активация мышц пассивно движущейся руки различна, в зависимости от того, вызываются ли эти движения внешней силой или другой рукой самого обследуемого. Эти отличия вызваны вовлечением межконечностных связей во втором случае. Показано, что эти функциональные связи нарушены у больных, и выраженность этих нарушений зависит от степени пареза. Увеличение нагрузки на одну из рук способствует усилению межконечностного взаимодействия и, как следствие, повышению мышечной активности пассивно движущейся руки.

Получены новые сведения об особенностях межконечностной координации при выполнении сочетанных движений рук и ног постинсультными больными. У пациентов после инсульта существенно лучшая координация наблюдалась при совершении конечностями одного пояса синфазных движений по сравнению с противофазными движениями.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы обусловлена тем, что она вносит определенный вклад в решение фундаментальной проблемы физиологии движений – проблемы организации управления ритмическими движениями. В работе получены новые данные о функциональных межконечностных связях у человека, их гибкости, зависимости от афферентных и супраспинальных влияний, а также от пространственных и временных параметров совершаемых движений. Проведено сравнение межконечностных связей у здоровых людей и пациентов после инсульта головного мозга.

Практическая значимость работы заключается в том, что выявленные свойства межконечностных взаимодействий могут быть использованы для оптимизации процесса восстановления нарушенных двигательных функций за счет использования совместных движений рук и ног в ходе реабилитации пациентов после инсульта. Выявленные важные особенности постинсультных двигательных нарушений уже учитываются при разработке методик двигательной реабилитации и проведении процедур у больных. Для этого ранее разработанная реабилитационная установка для ног (АПК «Вертикаль») была дополнена блоком, позволяющим осуществлять ритмические движения верхних конечностей. Эта установка в настоящее время активно используется в различных клиниках (Центральная клиническая больница РАН, Клиническая больница № 83 ФМБА) для восстановительного лечения пациентов после инсульта. Исследования были выполнены в соответствии с планом Института

проблем передачи информации РАН по темам: «Исследование и моделирование информационных процессов в физиологических и биофизических системах», гос. регистрация № 01200959234; «Информационные взаимодействия в живых системах: механизмы сенсомоторной интеграции, математическое моделирование и диагностический анализ физиологических процессов», гос. регистрация № 01201267227. Работы поддержаны грантами РФФИ № 09-04-01183, ФЦП № 16.512.11.2221, РФФИ офи-м № 11-04-12139 и 13-04-12076.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Связи между генераторами нижних конечностей являются более жесткими, чем связи между нейронными сетями, ответственными за циклические движения верхних конечностей. У пациентов после инсульта такие связи между конечностями одного пояса существенно ослаблены.
2. При циклических движениях конечностей влияния с рук на ноги и с ног на руки различны. У здоровых обследуемых влияние с рук на ноги выражается в увеличении активности мышц ног, этот эффект не проявляется у больных. Наиболее сильное влияние с рук на ноги проявляется при движениях рук и ног с фазовыми соотношениями, присущими естественной локомоции, в то время как у постинсультных больных активация мышц рук и ног не зависит от фазовых соотношений между движениями конечностей. Влияние с ног на руки проявляется в уменьшении активности проксимальных мышц рук, как у здоровых обследуемых, так и у пациентов после инсульта.
3. У здоровых обследуемых нагружение верхних конечностей приводит к существенному возрастанию влияний с рук на ноги. Повышение частоты ритмических движений вызывает более сильное нарастание активности в мышцах-сгибателях рук и ног при движениях с фазовыми соотношениями, присущими естественной локомоции, по сравнению с движениями с другими фазовыми соотношениями.
4. У здоровых обследуемых пассивные ритмические движения руки вызывают рефлекторную активацию ее мышц. Эта активность может быть усилена вовлечением межконечностных связей при инициации пассивных движений руки активными движениями другой руки. Также эта активность может быть увеличена дополнительным нагружением контралатеральной руки.
5. У пациентов после инсульта нарушены супраспинальные влияния на нейронные механизмы, обеспечивающие взаимодействие рук при их циклических движениях. С повышением степени пареза у больных понижается рефлекторная активация мышц пассивно движущейся паретичной руки, а также влияние нагружения другой руки на эту активацию.
6. У пациентов после инсульта при совершении конечностями одного пояса синфазных движений наблюдается существенно лучшая координация по сравнению с противофазными движениями, как при движениях только рук или ног, так и при движениях всех четырех конечностей.

Публикации по теме диссертации и апробация результатов

По материалам диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах, включенных в рекомендованный ВАК РФ список. Основные результаты и положения диссертации были представлены, докладывались и обсуждались на международных и отечественных конференциях: X Всероссийская конференция по

биомеханике «Биомеханика-2010» (Саратов, 2010), XXI Съезд Физиологического общества им. И.П. Павлова (Калуга, 2010), 33-я конференция молодых ученых и специалистов ИППИ РАН «ИТиС-2010» (Геленджик, 2010), VI Всероссийская с международным участием Школа-конференция по физиологии мышц и мышечной деятельности «Системные и клеточные механизмы в физиологии двигательной системы и мышечной деятельности» (Москва, 2011), IV Всероссийская с международным участием конференция по управлению движением, приуроченной к 90-летию юбилею кафедры физиологии ФГБОУ ВПО «РГУФКСМиТ» (Москва, 2012), Восьмой международный междисциплинарный конгресс «Нейронаука для медицины и психологии» (Судак, Украина, 2012), 35-я конференция молодых ученых и специалистов ИППИ РАН «ИТиС-2012» (Петрозаводск, 2012), VII Всероссийская с международным участием Школа-конференция по физиологии мышц и мышечной деятельности «Новые подходы к изучению классических проблем» (Москва, 2013), Девятый международный междисциплинарный конгресс «Нейронаука для медицины и психологии» (Судак, Украина, 2013), 36-я конференция молодых ученых и специалистов ИППИ РАН «ИТиС-2013» (Калининград, 2013), XXII Съезд Физиологического общества им. И.П. Павлова (Волгоград, 2013).

Объём и структура работы

Диссертация изложена на 125 страницах машинописного текста, включает 4 таблицы, 21 рисунок. Работа состоит из введения, обзора литературы, 4 глав описания методов и собственных результатов исследований, их обсуждения, заключения, выводов и списка цитируемой литературы. Список цитируемых работ содержит 174 источника.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании приняли участие здоровые обследуемые и больные, перенесшие инсульт полушарной локализации. В работе данное заболевание рассматривалось как модель одностороннего церебрального нарушения и вызванных им расстройств движений. Основными критериями включения больных в исследование были: стабильные показатели гемодинамики, отсутствие других неврологических или ортопедических нарушений, не связанных с основным заболеванием и препятствующих проведению обследований, отсутствие выраженного спастического синдрома (более 1 балла по модифицированной шкале Эшфорта (Bohannon & Smith, 1987)). В исследование не включались больные с выраженными нарушениями со стороны высших психических функций и с грубыми речевыми нарушениями. Все здоровые обследуемые и больные предварительно были осведомлены о процедурах и задачах исследования и давали письменное согласие на участие в нем. Исследование проводилось в соответствии с основополагающими этическими принципами Хельсинкской Декларации.

Часть 1. Изучение взаимных влияний верхних и нижних конечностей при их совместных движениях

Экспериментальная установка состояла из функциональной кровати и установленных на ней специальных модулей, позволяющих совершать произвольные ритмические движения ног и противофазные, кинематически связанные движения рук

в вертикальном направлении (Рисунок 1А). В исследовании приняли участие 10 здоровых обследуемых (59±16 лет) и 16 больных (66±12 лет) с различной степенью постинсультных двигательных нарушений.

У здоровых обследуемых эксперимент проводился при трех основных условиях для рук: 1) активные движения обеих рук (А); 2) активные движения одной руки, при которых другая рука вынужденно участвовала в движении, но была, по возможности, полностью расслаблена (пассивна) (АП); 3) пассивные движения расслабленной руки, навязанные экспериментатором (П). В условии АП обследуемого просили поддерживать одну руку, закрепленную за кисть, в максимально расслабленном состоянии и не противодействовать ее движениям, при этом другая рука активно поднимала и опускала ее. В условии П одна рука лежала свободно на кровати, а другая, пассивная рука поднималась и опускалась экспериментатором через блок. В условии АП применяли также нагрузки на активную руку силой около 30 Н (АПЗ) и 60 Н (АП6): грузы массой 3 кг и 6 кг крепились к ремню над пассивной рукой. При всех условиях для движений рук эксперименты были проведены как при неподвижных ногах (ноги при этом были выпрямлены и расслаблены), так и при сопутствующих движениях ног в диагональной синергии с руками, соответствующей естественной локомоции человека. При активных движениях рук ноги двигались активно (НА+А), или пассивно (НП+А) – экспериментатором. В условиях, когда одна рука была пассивна, ноги двигались только в активном режиме (НА+АП, НА+АПЗ, НА+АП6).

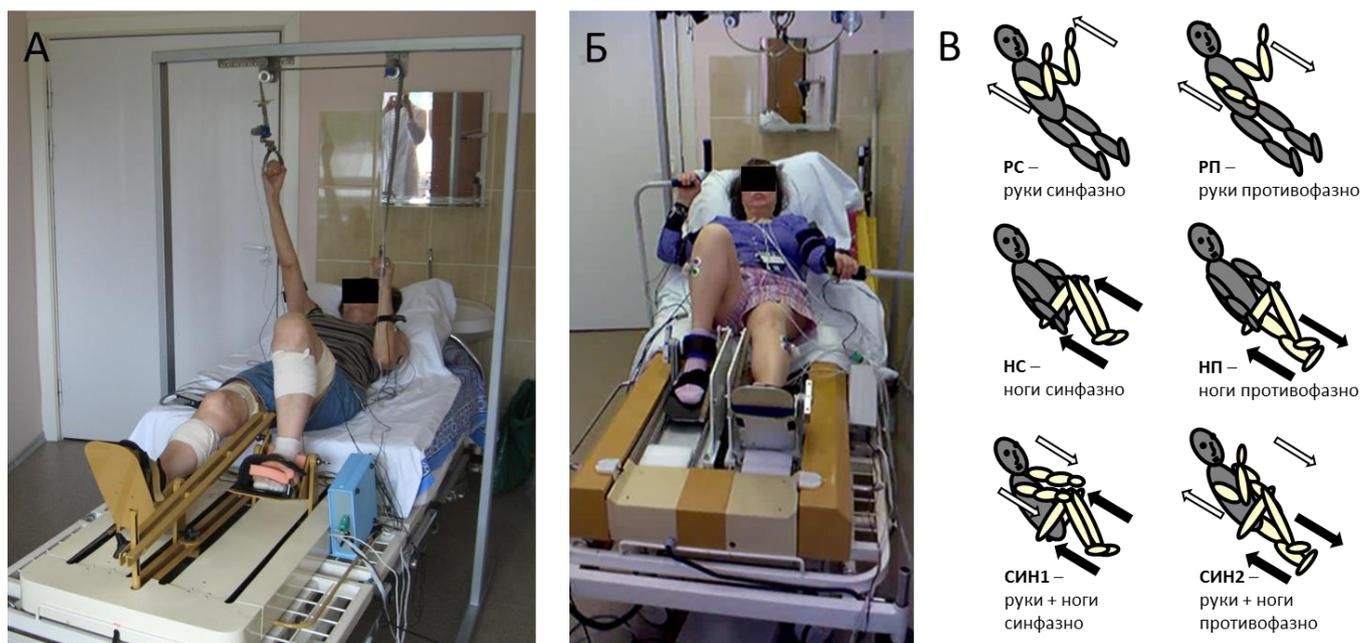


Рисунок 1. Два варианта экспериментальной установки (А и Б) и схематическое изображение основных условий эксперимента для установки варианта Б (В). Стрелками показано направление движения конечности (светлые стрелки – движение рук, темные стрелки – движение ног).

Для аналогичного исследования больные были разделены на две подгруппы по степени пареза мышц верхних конечностей: больные, которые могли произвольно выполнять двигательную задачу обеими руками (3-5 баллов в паретичной руке по шестибальной шкале (Леонтьев и Малашенко, 2005)), составили 1-ю подгруппу; больные, которые не могли активно выполнять двигательную задачу паретичной

рукой (0-2 балла в паретичной руке), составили 2-ю подгруппу. Часть двигательных задач, предложенных здоровым обследуемым, не могли быть полноценно выполнены больными из-за их двигательных нарушений, поэтому протокол исследования был скорректирован и содержал меньшее количество проб, чем для здоровых обследуемых. Тем не менее, предлагаемые больным двигательные задачи были максимально близки к ранее предложенным здоровым обследуемым.

Исследование у больных проводилось при трех различных двигательных условиях: 1) циклические движения только верхних конечностей, 2) шагоподобные движения только нижних конечностей, 3) совместные движения рук и ног в диагональной синергии между конечностями. В условии 1) больные совершали движения руками в двух различных режимах: активные (А) движения обеими руками, пассивные (П) движения одной рукой (вторая рука лежала на кровати), при которых она была полностью расслаблена, и ее движения осуществлялись экспериментатором. В режиме А давали дополнительную нагрузку 30 Н на непаретичную руку (А3). Движения рук во всех режимах совершались с одинаковой скоростью, соответствующей темпу шагательных движений, выполняемых больным. В условии 2) больные совершали активные шагательные ритмические движения обеими ногами (Н). В условии 3) движения ног осуществлялись в сочетании с различными режимами движений рук (А, А3).

Часть 2. Изучение влияний фазовых соотношений между движениями конечностей и внешних афферентных воздействий на степень связывания генераторов ритмики верхних и нижних конечностей

В экспериментальной установке, описанной в части 1, модуль для движений рук был заменен на альтернативный (Рисунок 1Б), который позволял совершать как независимые движения одной рукой, так и синфазные или противофазные движения обеими руками преимущественно в горизонтальном направлении. Также модуль для движений верхних конечностей позволял осуществлять пассивные движения одной из рук синфазными или противофазными движениями контралатеральной руки. Были обследованы 10 здоровых обследуемых (56 ± 16 лет) и 14 больных (60 ± 13 лет).

Как здоровые обследуемые, так и постинсультные больные осуществляли отдельные и совместные циклические движения рук и ног в следующих режимах: 1) активные движения левой/правой руки (Р); 2) активные движения левой/правой ноги (Н); 3) синфазные движения обеих рук (РС); 4) противофазные движения обеих рук (РП); 5) синфазные движения обеих ног (НС); 6) противофазные движения обеих ног (НП); 7) совместные движения рук и ног, сочетающие в себе разнонаправленные синфазные движения обеих рук и синфазные движения обеих ног (синергия - СИН 1); 8) совместные противофазные движения рук и противофазные движения ног (синергия - СИН 2) (Рисунок 1В). Сочетание движений рук и ног в последней двигательной синергии было аналогичным естественной локомоции человека. Экспериментальные условия также включали двигательные задачи при пассивных движениях одной из рук: 1) пассивные движения одной руки, навязываемые экспериментатором (П); 2) пассивные движения одной руки, навязываемые синфазными (АП-РС) или противофазными (АП-РП) движениями контралатеральной руки. У больных в качестве пассивной задействовали только паретичную руку. Во всех описанных двигательных условиях и здоровые обследуемые, и больные совершали движения в удобном для них темпе. Для исследования афферентных воздействий на 6 здоровых обследуемых были

проведены два дополнительных эксперимента: 1) в условиях СИН1, СИН2, АП-РС, АП-РП применяли нагрузку 25 Н или на обе руки, или на одну руку; 2) в условиях СИН1, СИН2 и П осуществляли дополнительно движения в медленном и быстром темпе. У постинсультных больных в условии АП-РП также применяли нагрузку 25 Н на непаретичную руку.

Часть 3. Регистрация и обработка данных

Изменения углов в коленных и локтевых суставах регистрировали при помощи потенциометрических датчиков. Электромиографическую активность (ЭМГ) мышц плеча (*m. deltoideus anterior* – DA и *m. deltoideus posterior* – DP) и предплечья (*m. triceps brachii* – ТВ и *m. biceps brachii* – ВВ) обеих рук, а также голени (*m. tibialis anterior* – ТА и *m. gastrocnemius lateralis* – Gl) и бедра (*m. rectus femoris* – RF и *m. biceps femoris* – BF) обеих ног регистрировали поверхностными электродами с использованием усилителя “ВАК” (США). Полученные данные оцифровывали с частотой 1000 Гц и вводили в компьютер. В каждом условии было записано по 1 пробе длительностью 60 с (у больных 30-60 секунд в зависимости от их двигательных возможностей).

ЭМГ сигнал фильтровали частотой 20-1000 Гц, выпрямляли и строили его огибающую (10 Гц). В каждой пробе выбирали в установившемся двигательном режиме 10 циклов у здоровых обследуемых и 3-5 циклов движений у больных (в связи с укороченной длительностью пробы), проводили усреднение по отобранным циклам. Для каждой мышцы рассчитывали среднюю амплитуду ЭМГ за цикл, а также глубину модуляции ЭМГ активности по формуле: $M = \frac{\text{ЭМГsd}}{\text{ЭМГmean}}$, где ЭМГsd – среднеквадратичное отклонение амплитуды ЭМГ, ЭМГmean – средняя амплитуда ЭМГ. У здоровых обследуемых величину амплитуды ЭМГ активности для каждой мышцы рук в каждом условии нормировали на соответствующую величину активности этой мышцы в условии А (или Р). У перенесших инсульт больных нормировали на величину активности этой мышцы в условии П, так как в условии А (или Р) у больных существенно выражена асимметрия активации гомонимных мышц паретичной и непаретичной рук. Для проведения сравнения данных, полученных при обследовании больных и здоровых обследуемых, для последних дополнительно производили ту же нормировку, что и для больных (на активность мышц в условии П). Изменение нормировки для здоровых обследуемых существенно не влияло на основные результаты, получаемые для них. Величину ЭМГ активности мышц ног нормировали на активность соответствующих мышц в условии НА (или Н). Для оценки правильности выполнения сложно-координированных задач, вовлекающих в движение две или четыре конечности, вычисляли корреляции между механограммами движений рук и ног. У постинсультных больных относительную степень координационной сложности двигательной синергии определяли по отклонению коэффициента корреляции от абсолютного, то есть по средней разнице между абсолютным коэффициентом корреляции (1 для синфазных движений, -1 – для противофазных) и коэффициентом корреляции у больных в каждом конкретном условии. Для проверки статистической значимости использовали Т-критерий Вилкоксона, для анализа различий между несвязанными выборками (больные - здоровые обследуемые) – U-критерий Манна-Уитни. Результаты статистического анализа считались достоверными, если вероятность ошибки была менее 0.05. Данные представлены в виде среднего значения ± среднеквадратичная ошибка.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Часть 1. Взаимовлияния верхних и нижних конечностей у здоровых обследуемых

В условиях АП, АПЗ и АП6 у всех обследуемых наблюдалась ЭМГ активность в мышцах пассивной руки (Рисунок 2А), наибольшая амплитуда и глубина модуляции которой отмечалась в DA. В условии АП для пассивной руки амплитуда в этой мышце в среднем составляла $92 \pm 23\%$ от её активности в условии А (Рисунок 2Б), глубина модуляции – $52 \pm 15\%$. При увеличении нагрузки на активную руку наблюдалось значимое увеличение амплитуды ЭМГ в DA по сравнению с условием АП: в 2.6 ± 0.5 раза для АПЗ ($p < 0.05$) и 3.8 ± 0.9 раза для АП6 ($p < 0.05$) (Рисунок 2Б). Независимо от нагрузки глубина модуляции в этой мышце значимо возрастала в среднем в 4.1 ± 1.4 раза ($p < 0.05$).

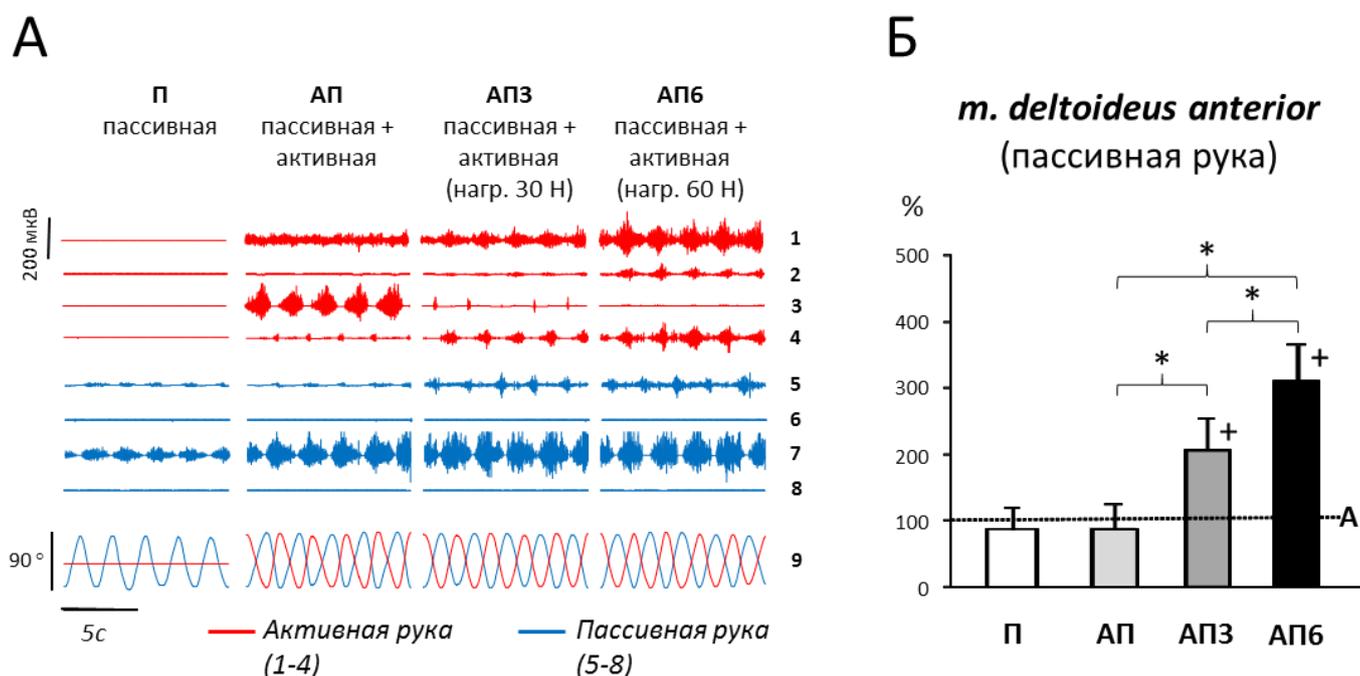


Рисунок 2. А. Пример записи ЭМГ активности одного обследуемого при ритмических движениях рук в разных условиях эксперимента. Сверху вниз: ЭМГ (в мкВ) левой активной (1-4) и правой пассивной руки (5-8) 1,5 – *m. biceps brachii*; 2,6 – *m. triceps brachii*; 3,7 – *m. deltoideus anterior*; 4,8 – *m. deltoideus posterior*; 9 – кривые смещений лучезапястных суставов по вертикали (в градусах), отклонение вверх соответствует сгибанию плечевого сустава. **Б.** Усредненные по всем обследуемым, нормированные на активность в условии А (активные движения обеих рук), величины ЭМГ активности мышцы DA пассивной руки в различных условиях эксперимента. Активность мышц рук в условии А показана пунктирной линией. * – достоверные различия ($p < 0.05$) между условиями эксперимента. + – значимые отличия от условия А.

Таким образом, ритмические движения одной руки оказывают влияние на генерацию электрической активности в мышцах-антагонистах другой, пассивно двигающейся в противофазе, руки. Хотя взаимовлияния между руками при ритмических движениях слабее, чем для ног (Carroll et al., 2005; Balter & Zehr, 2007), нами показано, что при

определенной двигательной задаче можно не только активизировать нейронный механизм взаимодействия верхних конечностей, но и усилить влияние с одной руки на другую, повышая активность мышц одной из конечностей. Нейронное взаимодействие между верхними конечностями может осуществляться как посредством спинальных комиссуральных интернейронов, так и с участием супраспинальных уровней ЦНС, в том числе моторной коры, посредством проприоспинальной системы интернейронов.

При движениях ног совместно с руками (условие НА+А) ЭМГ активность DA и BB в фазу активации этих мышц была значимо ниже ($p < 0.05$), чем в условии А. Помимо этого активность мышцы DA активной руки в условии НА+АП по сравнению с условием АП была существенно меньше ($p < 0.05$). При нагружении одной из рук ЭМГ активность в ее мышце BB при совместных движениях с ногами существенно уменьшалась в условиях НА+АП3 и НА+АП6 по сравнению с АП3 и АП6. В условиях АП3 и АП6 движения ног не оказывали существенного влияния на величину ЭМГ активности мышц пассивной руки. Уменьшение активности в мышцах рук при совместных ритмических произвольных движениях рук и ног может быть связано с взаимодействием генераторов ритмики верхних и нижних конечностей.

Нейронное взаимодействие между руками и ногами было показано в работе Дитца (Dietz et al., 2001), который наблюдал ответы в проксимальных мышцах рук, появляющиеся при возмущениях ходьбы или во время электрической стимуляции большеберцового нерва. Подтверждением существования подобного взаимодействия является изменение рефлекторной возбудимости мышц неподвижных рук во время циклических движений ног (Sasada et al., 2010).

Добавление активных ритмических движений рук к произвольным шагательным движениям ног (НА+А) значимо увеличивало ЭМГ активность по сравнению с условием НА в мышце BF в фазу ее активности на $13 \pm 5\%$ ($p < 0.05$) и в ГА на $26 \pm 21\%$ ($p < 0.05$) (Рисунок 3). В остальных регистрируемых мышцах ног значимых изменений активности обнаружено не было. Когда одна из рук двигалась в пассивном режиме (НА+АП), активность в большинстве регистрируемых мышц ног существенно снижалась ($p < 0.05$) по сравнению с активностью этих мышц в условиях НА и НА+А. Увеличение нагрузки на активную руку приводило к возрастанию активности в мышцах обеих ног, которое для мышц BF, ГА и GI становилось значимым в условии НА+АП6 по сравнению с условием НА+АП ($p < 0.05$). Собственные данные согласуются с результатами исследований, в которых показано, что совместные движения верхних и нижних конечностей повышали активность мышц ног в условиях их пассивных, противофазных движений у здоровых обследуемых (Huang & Ferris, 2004; de Kam et al., 2013) и у пациентов с поражениями спинного мозга (Kawashima et al., 2008). Также показано, что альтернирующие, фазированные с движениями ног, движения рук приводят к увеличению активности как в проксимальных, так и в дистальных мышцах ног (Stephenson et al., 2010). По-видимому, одновременные циклические движения рук и ног существенно повышают проприоцептивный приток к мотонейронным пулам нижних конечностей, повышая уровень их возбудимости.

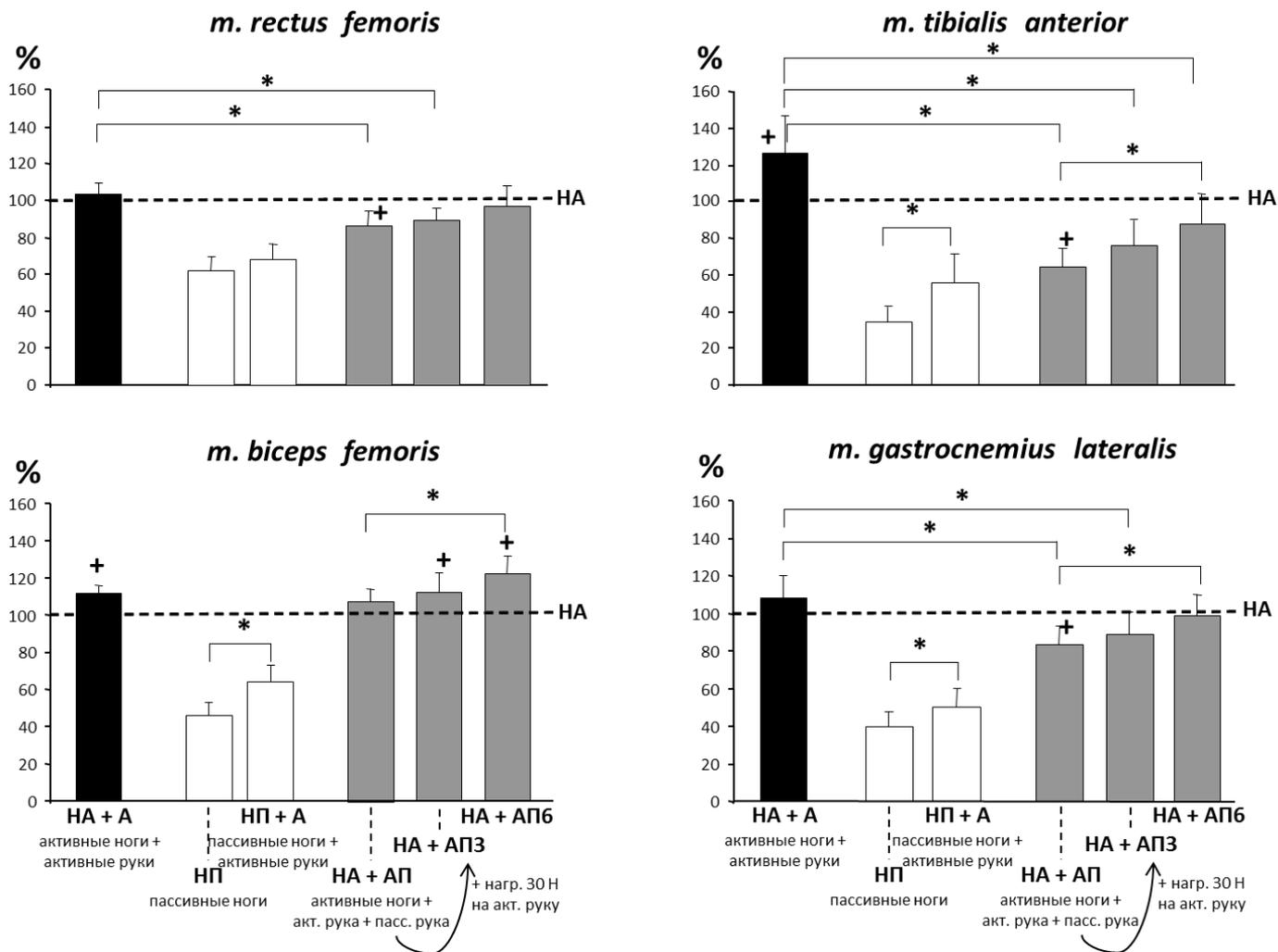


Рисунок 3. Усредненные по всем обследуемым, нормализованные на активность в условии HA (активные ноги), ЭМГ активности мышц ног в различных условиях эксперимента. Активность мышц ног в условии HA показана пунктиром. В отсутствие значимой асимметрии ЭМГ активности гомонимных мышц данные по обеим ногам усреднены. * – достоверные различия ($p < 0.05$) между условиями эксперимента. + – значимые отличия ($p < 0.05$) от условия HA.

Часть 2. Нарушения взаимовлияний верхних и нижних конечностей у перенесших инсульт больных

Как у больных 1-ой подгруппы, так и у больных 2-ой подгруппы наблюдалось преобладание величины ЭМГ активности в мышцах непаретичной руки над ЭМГ активностью в гомонимных мышцах паретичной руки. У больных 1-ой подгруппы это различие было существенно более значимым в проксимальных мышцах плеча (DA, DP), тогда как у больных 2-ой подгруппы – в дистальных (BB, TB). Также у больных с легким парезом активность мышц непаретичной руки преобладала не только над активностью в паретичной руке, но и над активностью гомонимных мышц рук у здоровых обследуемых при выполнении аналогичной двигательной задачи. По-видимому, мышечный дефицит паретичной руки вызывал повышенную компенсаторную активацию мышц в непаретичной руке (Dietz, 2011). Эта компенсация могла быть обусловлена тем, что неповрежденное полушарие было

существенно более активно у постинсультных больных, чем у здоровых обследуемых во время выполнения такого же движения, как было показано в работе Хэнлон (Hanlon et al., 2005).

У больных ЭМГ активность каждой из рук в условии П по сравнению с соответствующей ЭМГ активностью в условии А была значимо ($p < 0.01$) меньше во всех мышцах за исключением DA (так же, как и у здоровых обследуемых). В мышце DA она была больше в 1.9 ± 0.8 раза ($p < 0.05$) в паретичной и в 1.8 ± 0.5 раза ($p < 0.05$) в непаретичной руке у больных 1-ой подгруппы, но не отличалась значимо в паретичной и в непаретичной руке у больных 2-ой подгруппы. В случае приложения дополнительной нагрузки в 30 Н на непаретичную руку в паретичной руке у больных 1-ой подгруппы наблюдалась значимое увеличение ЭМГ активности в мышце DA в 1.4 ± 0.7 раза ($p < 0.05$) по сравнению с таковой в условии А (Рисунок 4А). В остальных мышцах существенных изменений обнаружено не было. У больных 2-ой подгруппы значимых различий в активности паретичной руки без и с нагрузкой не наблюдалось (Рисунок 4Б). По-видимому, у тяжелых больных пороги активации мотонейронных пулов (уровень возбудимости), иннервирующих мышцы паретичной руки, оказываются недостаточными для повышения частоты их разрядов и соответствующего повышения величины разрядов ЭМГ в паретичной руке.

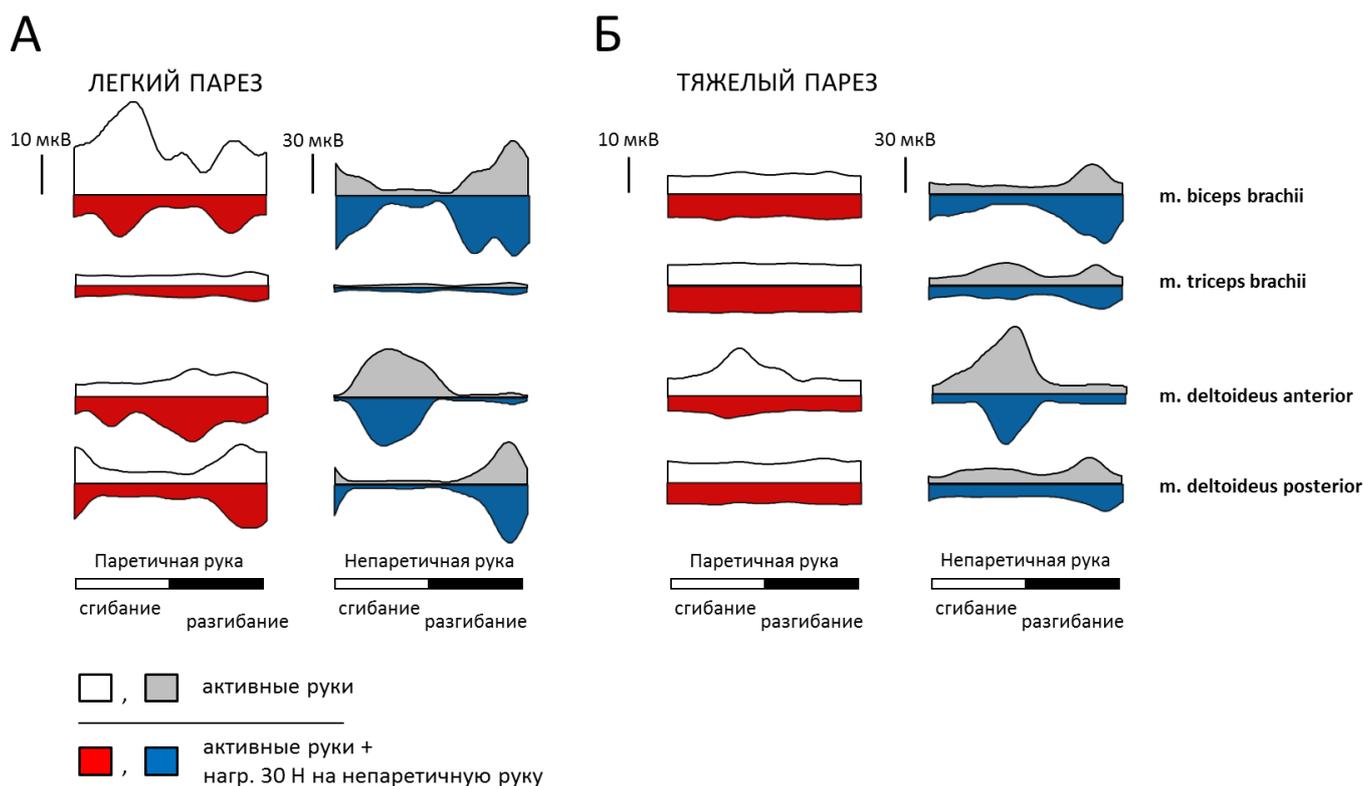


Рисунок 4. Влияние нагружения непаретичной руки на ЭМГ активность мышц обеих рук. Отраженная и сглаженная ЭМГ активность мышц рук у типичного больного с легким парезом (А) и у типичного больного с тяжелым парезом (Б).

Во время циклических движений рук совместно с шагательными движениями ног (условие А+Н) у больных наблюдалось уменьшение ЭМГ активности в проксимальных мышцах плеча как паретичной, так и непаретичной рук по сравнению

с условием А у больных обеих подгрупп (Рисунок 5А, Б) – как и у здоровых обследуемых. Влияние движений рук на активность в мышцах паретичной и непаретичной ног у больных было различным: нормированная ЭМГ активность мышц непаретичной ноги не изменялась у больных обеих подгрупп, тогда как в паретичной ноге у больных с сильным парезом движения рук уменьшали величину всплеск активности в мышцах бедра, а у больных со слабым парезом – уменьшалась активность в дистальных мышцах ноги. Данное исследование не выявило увеличения мышечной активности в ногах при совместных движениях верхних и нижних конечностей, как это было отмечено в работе Стефенсон у пациентов после инсульта при ходьбе по ленте тредбана (Stephenson et al., 2010). По-видимому, связь между нейронными сетями, генерирующими ритмическую активность верхних и нижних конечностей, зависит от уровня возбудимости этих сетей, который определяется пространственной организацией движения и наличием или отсутствием необходимости поддержания позы.

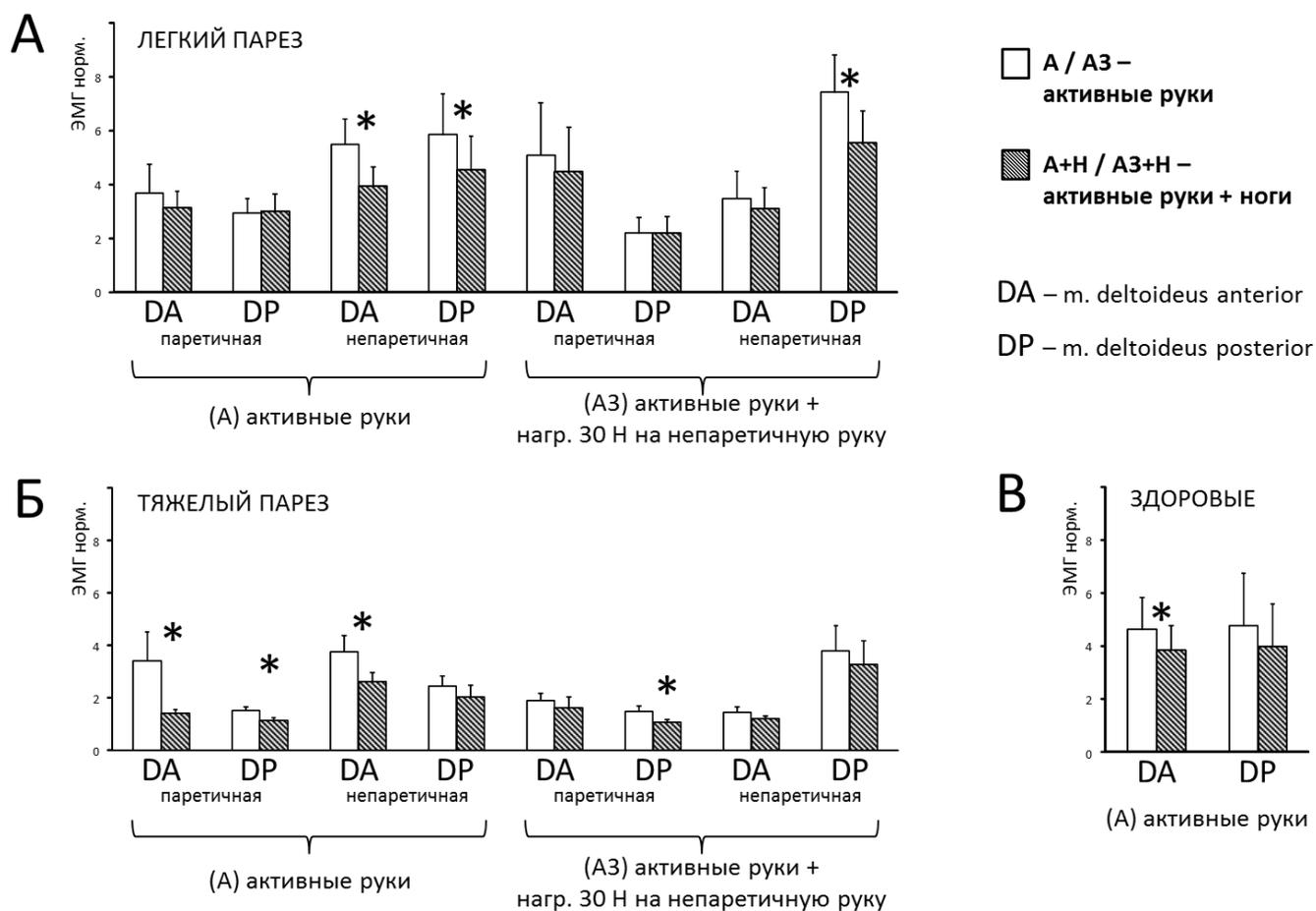


Рисунок 5. Влияние совместных движений верхних и нижних конечностей на активность в проксимальных мышцах рук. Представлены усредненные по всем обследуемым величины нормированной ЭМГ активности у больных 1-ой (А) и 2-ой (Б) подгруппы и здоровых обследуемых (В) в условиях А, А+Н и А3, А3+Н. * – достоверные различия ($p < 0.05$).

Часть 3. Влияния фазовых соотношений между движениями конечностей и внешних афферентных воздействий на функциональные связи между руками и ногами в норме

Активность мышц плеча при движениях только одной рукой изменялась при совместных как синфазных, так и противофазных движениях рук. Так, при РС активность ТВ значительно уменьшалась, а активность в ДР значительно увеличивалась ($p < 0.01$). При РП же наблюдалось значимое увеличение активности в ВВ. Нормированная активность мышц ВВ и ТВ при противофазных движениях рук была существенно больше их активности при их синфазных движениях в 1.4 ± 0.2 раза ($p < 0.001$) и в 1.1 ± 0.1 раза ($p < 0.05$), соответственно, а активность в ДР – существенно меньше на $21 \pm 15\%$ ($p < 0.05$). Активные движения обеих ног, как синфазные (НС), так и противофазные (НП), значимо не изменяли активность мышц бедра и голени по сравнению с их активностью при движениях каждой ногой по отдельности. Для каждой из исследуемых мышц их нормированные ЭМГ активности при выполнении двигательных синергий НС и НП были сходными. Большая зависимость суммарной мышечной активности в руках, чем в ногах, от выполняемой двигательной синергии отражает различия в рефлекторных связях между руками и между нижними конечностями. Связывание генераторов ритмики верхних конечностей (перекрестный эффект) реализуется как на кортикальном, так и на сегментарном уровнях, однако, основной вклад во взаимодействие генераторов ритмики для верхних конечностей вносят центральные команды (Hortobágyi et al., 2003). По-видимому, тоническое состояние генераторов шагания нижних конечностей в меньшей степени зависит от центральных влияний, чем состояние аналогичных генераторов верхних конечностей.

При выполнении СИН1 (Рисунок 1В, 6А) наблюдалось значимое изменение нормированной активности мышц рук по сравнению с активностью соответствующих мышц при движениях только одной рукой: существенно уменьшилась активность в ВВ и ТВ в среднем на $12 \pm 11\%$ ($p < 0.05$) и увеличилась в ДР на $33 \pm 15\%$ ($p < 0.01$). При этом нормированная активность в основных мышцах ног не изменилась. При выполнении СИН2 (Рисунок 1В, 6А) степень активации мышц была иной: наблюдалось увеличение активности в ВВ на $20 \pm 9\%$ ($p < 0.001$), уменьшение активности в ТВ на $10 \pm 9\%$, а также увеличение нормированной активности в большинстве мышц ног. Данная синергия по сравнению с СИН1 характеризовалась существенно большей активностью в ВВ, ВГ и ТА и меньшей активностью в ДР. Соотношение активности в мышцах рук при противофазных и синфазных движениях как при движениях только рук, так и при совместных движениях рук и ног было сходным. Однако соотношение активности в мышцах ног при их противофазных и синфазных движениях изменилось: если при движениях только ног различий в активности мышц в зависимости от типа движений не наблюдалось, то при подключении движений рук активность в ВГ и ТА стала существенно больше при противофазных движениях (Рисунок 6Б).

Такое влияние с рук на ноги указывает на преобладание диагональных связей, которые активируются при противофазных движениях (СИН2), что, по-видимому, соответствует активации связей между генераторами ритмики, присущей естественному шаганию. Сходная преобладающая активация диагональных связей показана Накаджимой при выполнении шагания на руках (Nakajima, 1991). При увеличении нагрузки на обе руки с 10Н до 25Н, совместные движения рук и ног приводили к существенному увеличению нормированной активности в мышцах ВГ и ТА, Г1 ($p < 0.05$) (Рисунок 6Б) по сравнению с той же активностью в условиях без

нагрузки как для СИН1, так для и СИН2. Значительное увеличение проприоцептивного нисходящего притока в одинаковой степени повышало моторный выход в нижних конечностях независимо от двигательной синергии, что свидетельствует о сходном усилении межконечностных взаимовлияний в этих двух случаях.

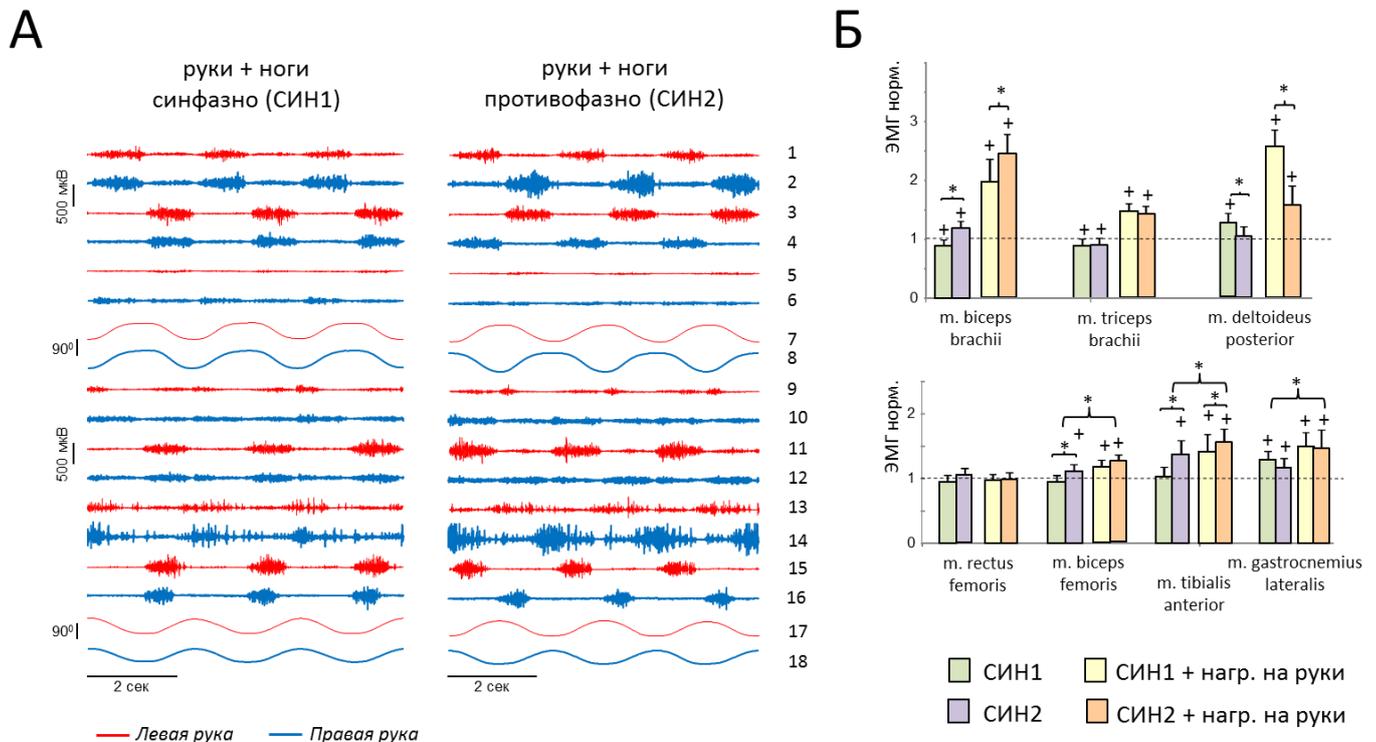


Рисунок 6. А. Пример записи совместных ритмических движений рук и ног одного обследуемого с синергией СИН1 и с синергией СИН2. **Б.** Усредненные по всем обследуемым, нормированные величины ЭМГ активности мышц рук (верхние диаграммы) и ног (нижние диаграммы) в условиях СИН1, СИН1+нагр., СИН2, СИН2+нагр. Сверху вниз: ЭМГ (в мкВ) мышц левой (светлые линии) и правой (темные линии) рук (1-6) и мышц левой (светлые линии) и правой (темные линии) ног (9-16). 1,2 – *m. biceps brachii* (BB); 3,4 – *m. triceps brachii* (TB); 5,6 – *m. deltoideus posterior* (DP); 9,10 – *m. rectus femoris* (RF); 11,12 – *m. biceps femoris* (BF); 13,14 – *m. tibialis anterior* (TA); 15,16 – *m. gastrocnemius lateralis* (Gl). 7, 8 – изменение углов в локтевом суставе (в градусах), 17,18 – изменение углов в коленном суставе (в градусах). Отклонение вверх соответствует сгибанию в локтевом и коленном суставе. * – достоверные различия ($p < 0.05$) между условиями эксперимента. + – значимые отличия от активности соответствующих мышц при движениях только одной конечностью.

Паттерн активности мышц конечностей изменялся с увеличением частоты совместных движений рук и ног: для всех мышц рук и ног как при СИН1, так и при СИН2 нормированная активность увеличивалась ($p < 0.05$). Подобное возрастание активности в мышцах ног наблюдалось в работе Као и Ферриса (Као & Ferris, 2005). Анализ зависимости нормированной мышечной активности от частоты движений показал, что наклон регрессионной прямой ($y = k \cdot x + b$) для мышц BB, BF и TA при

движениях в СИН2 был в среднем в 1.5 раза больше, чем при движениях в СИН1. Это может объясняться тем, что диагональные спинальные проекции при СИН2 вовлекаются в большей степени, чем при СИН1 (как было отмечено выше).

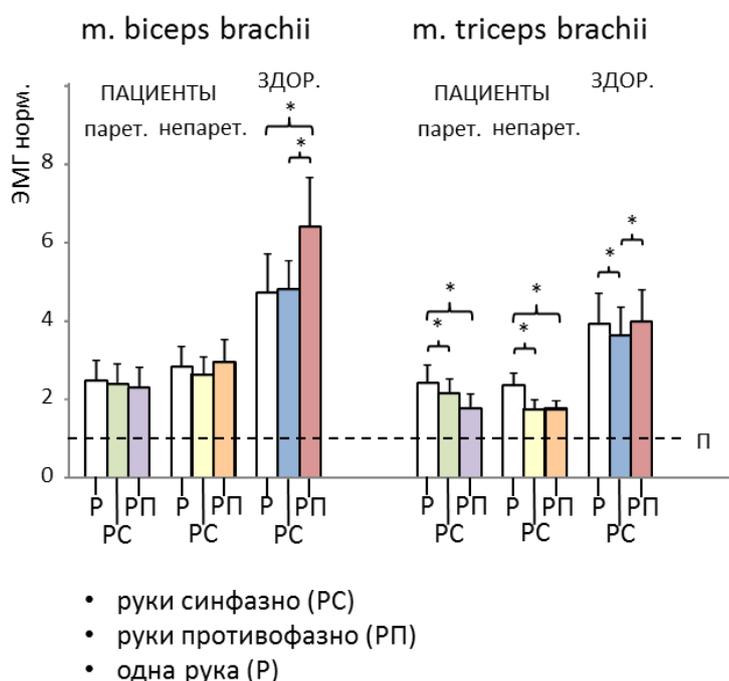
При пассивных движениях руки (условие П) в ее мышцах у 66% обследуемых наблюдалась вспышечная, фазированная с циклом движения, активность. Нагружение активной руки приводило к существенному возрастанию нормированной активности во всех мышцах пассивно движущейся руки по сравнению с условием АП ($p < 0.05$). Таким образом, независимо от паттерна и пространственной организации движений рук, рефлекторная активация мышц пассивно движущейся руки может быть вызвана при навязывании этих движений как извне, так и активными движениями контралатеральной руки.

Часть 4. Нарушения функциональных связей между верхними и нижними конечностями у перенесших инсульт больных

У постинсультных больных нормированная активность мышц паретичной и непаретичной рук при их отдельных движениях не различалась по амплитуде, но была значимо ($p < 0.05$) меньше, чем у здоровых обследуемых. В то же время глубина модуляции для мышц паретичных конечностей была существенно ($p < 0.05$) меньше таковой для гомонимных мышц непаретичных конечностей: для ВВ – на $43 \pm 10\%$ ($p < 0.01$), для ТВ – на $27 \pm 17\%$ ($p < 0.05$), для ВФ – на $36 \pm 15\%$ ($p < 0.01$). По сравнению со здоровыми обследуемыми глубина модуляции была ниже для большинства исследуемых мышц как паретичных, так и непаретичных конечностей.

Двигательные задачи для конечностей одного пояса были более сложными для выполнения по сравнению с отдельными движениями рук и ног. Совместные движения рук по сравнению с движениями каждой из рук по отдельности приводили к уменьшению величины ЭМГ в мышце ТВ как паретичной, так и непаретичной рук при РС и при РП (Рисунок 7А). По сравнению с движениями ног по отдельности при их совместных движениях наблюдалось уменьшение активности в RF паретичной ноги для НС и для НП (Рисунок 7Б). Сравнение мышечной активности и глубины модуляции ЭМГ сигнала для синфазных и противофазных движений конечностей одного пояса у перенесших инсульт больных не выявило значимых различий между двигательными синергиями. Однако в соответствии с отклонениями коэффициентов корреляции между механограммами (см. Методы исследования) синфазные движения конечностей одного пояса были более простыми для выполнения: в условии РС отклонение (0.44 ± 0.13) было существенно ($p < 0.05$) меньшим, чем в условии РП (0.59 ± 0.12); в условии НС отклонение (0.14 ± 0.03) было существенно ($p < 0.05$) меньшим, чем в условии НП (0.33 ± 0.04) (Рисунок 8). Это согласуется с данными о более сильных двигательных нарушениях при противофазных движениях ног по сравнению с синфазными (Tseng & Morton, 2010) и о тенденции к сильному синфазному связыванию верхних конечностей при их движениях в локтевых суставах (Rice & Newell, 2004) у пациентов после инсульта. По-видимому, произвольное выполнение больными синфазных движений облегчено из-за повышенной активности ипсилатерального кортикоспинального тракта (Misawa et al., 2008), большая часть волокон которого берет начало в дополнительной моторной коре, играющей важную роль в организации координации движений рук при выполнении бимануальных задач (Carter et al., 2014).

А



Б

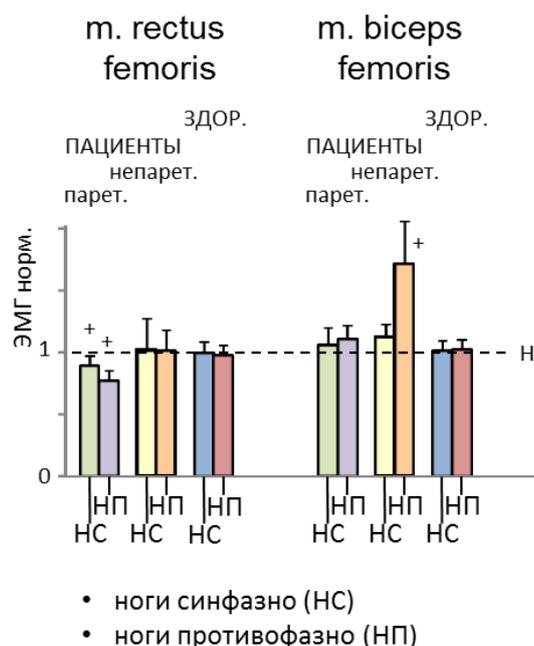


Рисунок 7. Влияние синфазных и противофазных движений рук и ног на ЭМГ активность в их мышцах у постинсультных больных. Усредненные по всем больным, нормированные величины ЭМГ активности мышц рук (**А**) в условиях Р, РС, РП и ног (**Б**) в условиях НС, НП. * – достоверные различия ($p < 0.05$) между условиями исследования. + – значимые отличия активности мышц ног в условиях НС и НП от активности соответствующих мышц при движениях только одной ногой (условие Н).

Наибольшую сложность для выполнения больными представляли двигательные задачи, в которые вовлекались все четыре конечности (СИН1 и СИН2). Влияние движений ног на активность в мышцах рук выражалось в уменьшении амплитуды ЭМГ активности в мышце ТВ паретичной и непаретичной рук как при СИН1, так и при СИН2 – в среднем на $28 \pm 63\%$ для паретичной ($p < 0.01$) и на $24 \pm 48\%$ для непаретичной ($p < 0.001$). При этом также существенно уменьшалась и глубина модуляции в мышцах паретичной руки. Влияния движений рук на величину активности и глубину ее модуляции в мышцах ног отмечено не было. Также в отличие от здоровых обследуемых не удалось обнаружить у больных значимого различия мышечной активности между СИН1 и СИН2. Более координированные движения выполнялись больными при синергии СИН1 по сравнению с синергией СИН2 (Рисунок 8): для СИН1 отклонения коэффициентов корреляции были существенно ($p < 0.01$) меньшими, чем для СИН2, как в паре рука-рука (0.36 ± 0.12 для СИН1 и 0.72 ± 0.15 для СИН2), так и в паре нога-нога (0.22 ± 0.08 для СИН1 и 0.43 ± 0.07 для СИН2). Таким образом, у перенесших инсульт больных нарушена межконечностная координация при выполнении сочетанных движений рук и ног. При совершении конечностями одного пояса синфазных движений наблюдается существенно лучшая координация по сравнению с противофазными, как при движениях только рук или ног, так и при движениях всех четырех конечностей. Настоящие данные согласуются с

ранее полученными свидетельствами о более стабильной координации однонаправленных движений по сравнению с противоположно направленными для конечностей как одного (Rice & Newell, 2004; Tseng & Morton, 2010), так и разных (Debaere et al., 2001) поясов у постинсультных больных. Произвольные движения непаретичной конечности могут активировать представительство этой конечности в первичной моторной коре и в дополнительной моторной коре, что в результате может содействовать произвольному сокращению мышц поврежденной конечности при выполнении симметричных движений обеими конечностями (Stewart et al., 2006; Summers et al., 2007).

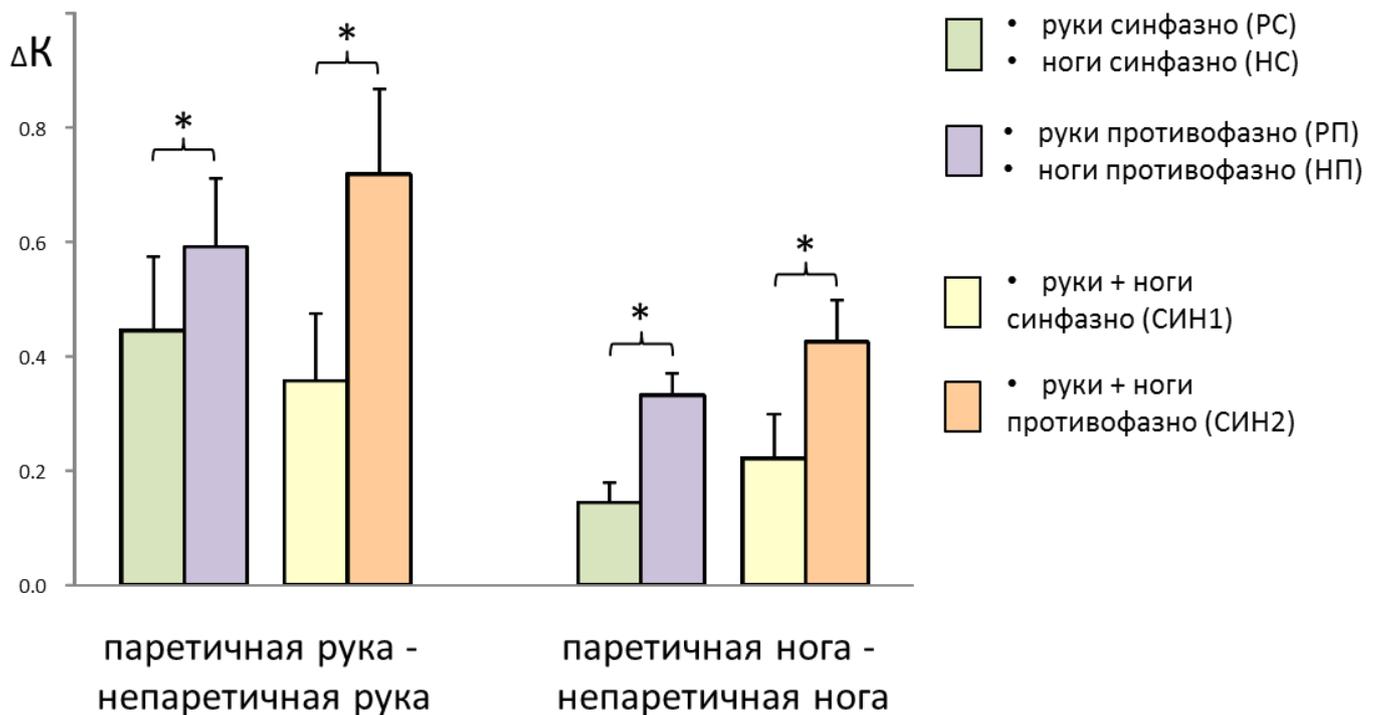


Рисунок 8. Отклонения коэффициентов корреляции между механограммами синфазных и противофазных движений от абсолютных (1 для синфазных движений, -1 – для противофазных) у постинсультных больных при координации паретичной и непаретичной рук или паретичной и непаретичной ног. * – достоверные различия ($p < 0.05$) между условиями исследования.

Пассивные движения как паретичной, так и непаретичной рук вызывали фазированные с циклом движения вспышки электрической активности, причем активность в мышце ВВ непаретичной и паретичной рук у больных была выше, чем у здоровых обследуемых в 1.6 ± 1.4 раза ($p < 0.05$) и в 2.9 ± 3.3 раза ($p < 0.01$), соответственно. В условии АП у больных в мышцах пассивно движущейся паретичной руки наблюдалась большая по сравнению с условием П активность в ВВ ($p < 0.05$) – независимо от фазового сдвига между движениями рук (АП-РС или АП-РП) – в среднем в 1.3 ± 0.2 раза ($p < 0.05$). Нагружение непаретичной руки приводило к дальнейшему росту нормированной активности в мышце ВВ пассивно движущейся руки в 1.8 ± 0.3 раза ($p < 0.05$) по сравнению с условием П. В то же время у больных в условиях АП-РС, АП-РП и АП-РП с нагрузкой для мышц пассивно движущейся

паретичной руки глубина модуляции значимо не отличалась от таковой в условии П, тогда как у здоровых обследуемых для мышцы ВВ пассивно движущейся руки глубина модуляции становилась значимо ($p < 0.05$) больше при увеличении проприоцептивного притока от активно движущейся руки. Также у больных глубина модуляции в мышце ТВ паретичной руки была существенно меньше, чем у здоровых обследуемых. Таким образом, у перенесших инсульт больных рефлекторная активация мышц в пассивно движущейся паретичной руке по амплитуде была больше, чем у здоровых обследуемых, что соответствует аналогичной активации мышц паретичной ноги пассивными движениями (Kautz et al., 2006). В то же время, глубина модуляции этой активности у больных по сравнению со здоровыми обследуемыми была снижена. Такой характер активации может быть связан с нарушением супраспинальных тормозных влияний, которые в норме подавляют нежелательную билатеральную активность (Lazarus, 1992) или с растормаживанием на пораженной и непораженной сторонах функционально подавленных в норме ипсилатеральных путей (Misawa et al., 2008).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большое разнообразие двигательных задач требует совместной координированной работы как верхних, так и нижних конечностей, но только ритмические движения активируют те нейронные связи, которые задействуются при естественной локомоции с вовлечением движений рук, синергичных движениям ног. В данной работе проведено исследование состояния межконечностных связей при выполнении циклических движений верхних и нижних конечностей в различных сочетаниях у здоровых обследуемых и у больных с церебральными нарушениями.

Получены новые данные, которые являются дополнительным доказательством наличия взаимовлияний, как между руками, так и между верхними и нижними конечностями. Установлено, что в положении лежа, в отсутствие необходимости поддержания вертикального положения, диагональные связи между руками и ногами могут вносить вклад в организацию сочетанных движений всех четырех конечностей. Показана сильная зависимость степени взаимодействия между нейронными структурами, регулирующими уровень мышечной активности верхних конечностей, как от двигательной задачи, так и от степени активации проприоцептивной системы. Также выявлена специфика нарушений координированной работы мышц верхних и нижних конечностей у перенесших инсульт больных при выполнении ими циклических движений.

В настоящее время в мире идет активный поиск методик, позволяющих повысить эффективность реабилитации пациентов после инсульта. Основными целями реабилитации больных с неврологическими нарушениями являются восстановление возможностей произвольной активации мышц и более координированной их работы. Эти цели в определенной степени взаимосвязаны. Из результатов настоящей работы следует, что методика, которая использует сочетанные движения рук и ног, может оказаться весьма эффективной и в будущем стать основой для создания новых средств двигательной реабилитации.

ВЫВОДЫ

1. Получены данные о наличии связей между нейронными сетями, ответственными за циклические движения конечностей одного пояса. При этом связь между генераторами нижних конечностей более жесткая, чем между соответствующими нейронными сетями верхних конечностей. У пациентов после инсульта такие связи между конечностями одного пояса существенно ослаблены.
2. При циклических движениях конечностей влияния с рук на ноги и с ног на руки различны. У здоровых обследуемых движения рук повышают активность мышц ног на 15-20%. Этот эффект не проявляется у больных. Наиболее сильное влияние с рук на ноги проявляется при движениях рук и ног с фазовыми соотношениями, присущими естественной локомоции, в то время как у больных после инсульта паттерн активности мышц рук и ног не зависит от фазовых соотношений между движениями конечностей. Влияние с ног на руки проявляется в уменьшении активности проксимальных мышц рук на 25-30%, как у здоровых обследуемых, так и у больных после инсульта.
3. Аfferентные и супраспинальные влияния оказывают существенные воздействия на межконечностные связи. У здоровых обследуемых нагружение верхних конечностей приводит к существенному возрастанию влияний с рук на ноги. Повышение частоты ритмических движений вызывает более сильное нарастание активности в мышцах-сгибателях рук и ног при движениях с фазовыми соотношениями, присущими естественной локомоции, по сравнению с движениями с другими фазовыми соотношениями.
4. У здоровых обследуемых пассивные ритмические движения руки вызывают рефлекторную активацию ее мышц. Величина этой активности может быть повышена (в среднем в 1.3 раза) вовлечением межконечностных связей при вызове пассивных движений руки активными движениями контралатеральной руки. Эта активность может быть дополнительно увеличена примерно в 1.5 раза нагружением контралатеральной руки.
5. У пациентов после инсульта рефлекторная активация мышц пассивно движущейся паретичной руки, а также влияние нагружения другой руки на эту активацию, понижается с повышением степени пареза. Это свидетельствует о нарушении супраспинальных влияний на нейронные механизмы, обеспечивающие взаимодействие рук при их циклических движениях.
6. У пациентов после инсульта нарушена межконечностная координация при сочетанных движениях рук и ног. При совершении конечностями одного пояса синфазных движений по сравнению с противофазными наблюдается существенно лучшая координация, как при движениях только рук или ног, так и при движениях всех четырех конечностей.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

1. Солопова И.А., Селионов В.А., Жванский Д.С., Гришин А.А. Взаимовлияние верхних и нижних конечностей при циклических движениях // Физиология человека. – 2011. – Т. 37. – № 4. – С. 55–64.
2. Селионов В.А., Солопова И.А., Жванский Д.С., Гришин А.А. Нарушения взаимовлияний верхних и нижних конечностей у пациентов после инсульта // Физиология человека. – 2012. – Т. 38. – № 3. – С. 62–72.
3. Селионов В.А., Солопова И.А., Жванский Д.С., Гришин А.А. Межконечностные взаимовлияния при циклических синфазных и противофазных движениях рук и ног и их зависимость от афферентных воздействий // Физиология человека. – 2014. – Т. 40. – № 4. – С. 65–77.

Статьи в сборниках трудов конференций

4. Жванский Д.С., Селионов В.А., Солопова И.А., Гришин А.А. Исследование взаимовлияния циклической активности верхних и нижних конечностей на общий паттерн мышечной активности // 33-я конференция молодых ученых и специалистов ИППИ РАН «ИТиС-2010», Геленджик, 2010, сборник трудов, С. 433–438.
5. Жванский Д.С., Селионов В.А., Солопова И.А., Гришин А.А. Нарушения межконечностных взаимодействий у пациентов после инсульта // 35-я конференция молодых ученых и специалистов ИППИ РАН. «ИТиС-2012», Петрозаводск, 2012, сборник трудов, С. 210–216.
6. Жванский Д.С., Селионов В.А., Солопова И.А., Гришин А.А. Зависимость взаимодействия между генераторами верхних и нижних конечностей от двигательной задачи и от пространственной организации движения у здоровых испытуемых // 36-я конференция молодых ученых и специалистов ИППИ РАН «ИТиС-2013», Калининград, 2013, сборник трудов, С. 163–170.

Тезисы в сборниках трудов конференций

7. Селионов В.А., Солопова И.А., Гришин А.А., Жванский Д.С. Исследование нейрофизиологических связей между руками при их ритмических движениях в положении лёжа у человека // X Всероссийская конференция по биомеханике «Биомеханика-2010», Саратов, 2010, сборник тезисов, С. 147–148.
8. Жванский Д.С., Селионов В.А., Солопова И.А., Гришин А.А. Зависимость нейронного взаимодействия между верхними и нижними конечностями человека от двигательной задачи // «XXI Съезд Физиологического общества им. И.П. Павлова», Калуга, 2010, тезисы докладов, С. 210.
9. Солопова И.А., Селионов В.А., Гришин А.А., Жванский Д.С., Алехин А.А. Взаимовлияния верхних и нижних конечностей при циклических движениях // VI Всероссийская с международным участием Школа-конференция по физиологии мышц и мышечной деятельности «Системные и клеточные механизмы в физиологии двигательной системы и мышечной деятельности», Москва, 2011, сборник тезисов, С. 69.
10. Солопова И.А., Селионов В.А., Жванский Д.С. Активация межконечностных связей при циклических движениях рук и ног в положении лежа // IV Всероссийская с международным участием конференция по управлению движением, приуроченная к 90-летию юбилею кафедры физиологии ФГБОУ ВПО «РГУФКСМиТ», Москва, 2012, сборник тезисов, С. 137.
11. Жванский Д.С., Солопова И.А., Селионов В.А. Нарушения взаимовлияний верхних и нижних конечностей у пациентов после инсульта // IV Всероссийская с международным участием конференция по управлению движением, приуроченная к 90-летию юбилею кафедры физиологии ФГБОУ ВПО «РГУФКСМиТ», Москва, 2012, сборник тезисов, С. 58.
12. Жванский Д.С., Селионов В.А., Солопова И.А. Сравнение взаимовлияний верхних и нижних конечностей при их циклических движениях в положении лежа у здоровых испытуемых и у пациентов после инсульта // Восьмой международный междисциплинарный конгресс «Нейронаука для медицины и психологии», Судак, 2012, тезисы докладов, С. 166–167.
13. Селионов В.А., Солопова И.А., Жванский Д.С., Гришин А.А., Шомахов М.А. Зависимость эффективности восстановления двигательных функций у пациентов после инсульта от типа взаимодействия между верхними и нижними конечностями в процессе нейрореабилитации // VII Всероссийская с международным участием Школа-конференция по физиологии мышц и мышечной деятельности «Новые подходы к изучению классических проблем», Москва, 2013, сборник тезисов, С. 63.
14. Селионов В.А., Солопова И.А., Жванский Д.С., Гришин А.А., Шомахов М.А., Алехин А.И. Зависимость степени межконечностных взаимодействий от двигательной задачи у пациентов после инсульта и у здоровых испытуемых // Девятый международный междисциплинарный конгресс «Нейронаука для медицины и психологии», Судак, 2013, тезисы докладов, С. 286–287.
15. Селионов В.А., Солопова И.А., Жванский Д.С., Гришин А.А., Шомахов М.А. Межконечностные взаимодействия во время циклических движений рук и ног у человека в положении лежа // «XXII Съезд Физиологического общества им. И.П. Павлова», Волгоград, 2013, тезисы докладов, С. 471.