

**МАКСИМАЛЬНАЯ АМПЛИТУДА ЭЛЕКТРОМИОГРАММ СГИБАТЕЛЕЙ
И РАЗГИБАТЕЛЕЙ РУК В СЕРИИ СЕАНСОВ УПРАВЛЕНИЯ
СИЛОВОМ ДЖОЙСТИКОМ У ЗДОРОВЫХ ДОБРОВОЛЬЦЕВ**

© 2020 г. Э. Р. Джелдубаева^{1, *}, Е. А. Бирюкова¹, С. А. Махин¹, Н. Д. Бабанов²,
Е. Н. Чуян¹, О. В. Кубряк²

¹Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Россия

²Научно-исследовательский институт нормальной физиологии им. П.К. Анохина,
Москва, Россия

*E-mail: delviza@mail.ru

Поступила в редакцию 17.08.2019 г.

После доработки 18.10.2019 г.

Принята к публикации 18.10.2019 г.

Построение востребованных сегодня в связи с развитием новой техники многомерных моделей мышечной адаптации у человека или решение прикладных задач, например, определения оптимального дозирования и режимов двигательной реабилитации, актуализируют комплексные исследования физиологических механизмов моторного контроля. Наблюдение на 20 здоровых праворуких добровольцах включало 4 целевых сеанса и 1 контрольный, выполнявшихся в течение 5 последовательных дней недели. Каждый целевой сеанс содержал простую задачу: поочередно, обеими руками, с помощью приложения силы к неподвижной рукояти (силовому джойстику), четко позиционируя локоть, управлять меткой на экране, расположенном напротив испытуемого. Целью рассматриваемой части комплексного проекта было исследование электромиографической активности мышц-сгибателей и разгибателей (поверхностного сгибателя пальцев, разгибателя пальцев, длинного разгибателя большого пальца и короткого сгибателя большого пальца кисти) обеих рук в поисках признаков мышечной адаптации при повторяющихся кратких сеансах целенаправленного управления с помощью руки по прикладываемой силе, в течение короткого курса. Анализ индивидуальных и групповых характеристик указывает на важную роль конфигурации, распределения активности (взаимодействия) исследуемых мышц в развитии адаптации, отличия в активности мышц правой и левой рук. Различия мышц-сгибателей и мышц-разгибателей на обеих руках проявлялись в больших значениях максимальных амплитуд ЭМГ и более выраженным сдвигом к снижению показателей от фона в направлении последующих целевых сеансов для мышц-сгибателей при нелинейном характере изменений.

Ключевые слова: мышечные адаптации, электрическая активность мышц рук, управляющие движения рук, статические и малоамплитудные движения рук, сгибатели и разгибатели рук, максимальная амплитуда электромиограммы, силовой джойстик

DOI: 10.31857/S0869813920010069

“Новые” приложения “старых” физиологических методов, таких, как электромиография, касаются, в том числе, активно развивающейся области — проектирования, практического применения и оценивания различных “дополняющих”,

“заменяющих”, “стыковочных” и “реабилитирующих” устройств для человека: протезов конечностей [1], экзоскелетов [2], управляющих устройств, учебных и реабилитационных тренажеров [3]. При этом ясного понимания того, как именно действуют на человека, к каким изменениям или адаптациям мышц, и в какие сроки, приводят эти новые вещи, и как лучше организовывать обучение их применению, еще только предстоит достичь. Накопление эмпирических данных и развитие теоретических представлений здесь касается, например, определения оптимальных дозировок и режимов в двигательной реабилитации [4] или создания многомерных моделей мышечной адаптации [5]. Иными словами, физиологическая сторона вопроса оказывается сегодня не менее важной, чем чисто инженерная, для гармоничного развития актуального направления, но малоисследованной. В рамках комплексного проекта, связанного с исследованием регуляции движений человека, нами получены электромиографические данные активности мышц рук 20 здоровых добровольцев при выполнении специфических управляющих воздействий — путем силовых воздействий (надавливаний) на неподвижную рукоятку контроллера для перемещения объекта на экране, с визуальным каналом обратной связи. Актуальность управления по силовым характеристикам обусловлена различными обстоятельствами — от возможности “улавливания” малоамплитудных, не достаточных для эффективного применения акселерометрии или гониометрии, движений конечностей у тяжело больных с целью диагностики и тренировок с биологической обратной связью, до специфических требований для управления напланетными роботами с борта космического корабля [6]. Применение в нашем наблюдении оригинального контроллера — “силового джойстика”, полагаем, способствовало актуальности и новизне полученных результатов. Целью предлагаемой части комплексного проекта было исследование электромиографической активности мышц-сгибателей и разгибателей (поверхностного сгибателя пальцев, разгибателя пальцев, длинного разгибателя большого пальца и короткого сгибателя большого пальца кисти) обеих рук в поисках признаков мышечной адаптации при повторяющихся кратких сеансах целенаправленного управления с помощью руки по прикладываемой силе, в течение короткого курса.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Испытуемые. Этические условия. Наблюдение выполнялось на базе Центра коллективного пользования “Экспериментальная физиология и биофизика” кафедры физиологии человека и животных и биофизики Таврической академии (СП) ФГАОУ ВО “Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского” на 20 условно здоровых молодых праворуких мужчинах-добровольцах 18–25 лет. Соблюдались современные этические нормы согласно требованиям локальной этической комиссии, в соответствии с Хельсинкской декларацией Всемирной Медицинской Ассоциации и ГОСТ Р 56509-2015 “Услуги населению. Надлежащая практика гуманитарных исследований”.

Процедура. Добровольцы, после инструктажа, предварительного обучения, выполняли 4 целевых сеанса и контрольный в течение 5 последовательных дней недели, в первой половине дня. В течение каждого целевого сеанса требовалось выполнить достаточно простую задачу: поочередно, обеими руками, с помощью приложения силы к **неподвижной** рукояти (силовому джойстику) четко позиционируя локоть, управлять меткой на экране, расположенном напротив испытуемого, по 60 с на каждый подход, с минутным отдыхом между подходами — рис. 1.

Кисть руки располагалась на рукояти удобным для испытуемого стандартным хватом, задаваемым формой рукояти, размером кисти и длиной пальцев добровольца, а также стандартной позицией локтя по разметке на экспериментальном



Рис. 1. Подготовка (прилаживание) и выполнение добровольцем процедуры “Динамическая проба” рукой с помощью силового джойстика.

Fig. 1. Preparation (attuning) and execution of the Dynamic Test by the volunteer with the power joystick.

столе. Управляемое движение метки соответствовало прилагаемой добровольцем к джойстику силе, а выполняемая траектория определялась появляющимися на экране по периметру центрального круга круглыми “мишенями”, на которые, согласно инструкции, наводилась управляемая метка, производилось удержание метки на мишени до ее исчезновения, и возвращение в центр для продолжения – алгоритм “Динамическая проба” в программе STPL (RU 2013610986). В процессе выполнения задачи и непосредственно перед проведением сеанса регистрировались электрофизиологические показатели, в частности, интерференционная поверхностная электромиография (ЭМГ) следующих мышц обеих рук: поверхностный сгибатель пальцев (*musculus flexor digitorum superficialis*); разгибатель пальцев (*musculus extensor digitorum*); длинный разгибатель большого пальца (*musculus extensor pollicis longus*); короткий сгибатель большого пальца кисти (*musculus flexor pollicis brevis*) – по RU 201911906. До и после каждого подхода снимался сигнал при свободном (“расслабленном”) обхвате рукоятки силового джойстика.

Перед проведением целевых сеансов, в отдельный день, однократно, проводился фоновый сеанс (“фон”, контроль), отличием которого от 4 целевых сеансов было простое не целенаправленное сжатие рукоятки добровольцем вместо управления (без обратной связи). Порядок сеансов представлен также на рис. 2.

С учетом того, что характеристики ЭМГ во многом зависят от положения электродов на мышце и обработки кожи, электроды в разные сеансы позиционировались максимально точно (одинаково) на руке добровольца, контактная поверх-

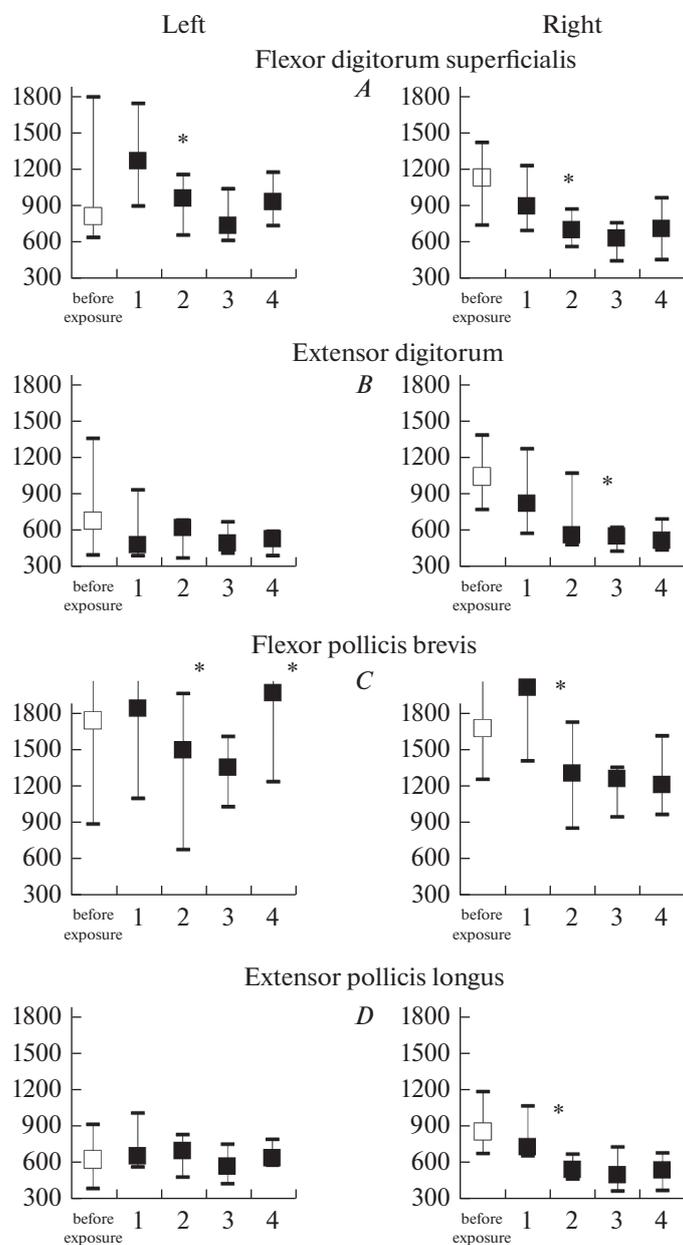


Рис. 2. Обобщенная динамика максимальной амплитуды ЭМГ в мышцах-сгибателях (A, C) и разгибателях (B, D) левой и правой рук исследуемых добровольцев – медианы и интерквартильный размах значений, белым выделено фоновое значение медианы. Звездочками выделены статистически значимые отличия последующего сеанса от предыдущего.

Fig. 2. The averaged dynamics of the maximum EMG amplitude values in flexor (A, C) and extensor (B, D) muscles in the volunteers' left and right hands – medians with interquartile range, the baseline median values are shown in a white color. Asterisks indicate statistically significant differences between the two subsequent sessions.

ность тщательно обрабатывалась. Использовались стандартные электроды для применявшегося оборудования.

Оборудование и программное обеспечение. В работе использовались: 1) многофункциональный комплекс электрофизиологических исследований “Нейрон-Спектр-5s” под управлением программы “Нейро-МВП.NETomega” – “Нейрософт”, Россия, № РОСС RU.ИМ18.Д00816. 2) Силовая платформа ST-150 с экраном обратной связи под управлением программы STPL – “Мера-ТСП”, Россия, N ФСР 2010/07900; RU.C.39.004.A N 41201; GMDN: 43114 Balance/mobility management system platform, 43115 Balance/mobility management system application software. 3) Силовой джойстик для ST-150 – RU 2018145572/14(076192).

Анализируемые показатели. Оценивалась максимальная амплитуда ЭМГ, рассчитываемая штатным программным обеспечением, в микровольтах (МкВ). Выбор здесь этого единственного показателя и исключение средних значений и характеристик турнов обусловлен представлением, что синхронизация двигательных единиц не оказывает существенного влияния на взаимосвязи между электромиограммой и развиваемой силой мышцы (необходимой здесь для управления силовым джойстиком) при условии одинакового уровня синхронизации на разных уровнях возбуждения [7]. Данные условия обеспечивались предварительным обучением испытуемых – внешние результаты выполнения задачи были весьма однородными: медианные значения результата в баллах (определяемых в программе STPL как количество регистрируемых (дискретных) удержаний метки общего центра давления в целевой зоне за период, соответствующее качеству управления движением (выполнению инструкции) испытуемым) были в диапазоне 21–25 баллов для обеих рук на всех сеансах наблюдения. Для анализа использовался каждый целый период выполнения задачи, в соответствии с описанием процедуры.

Статистический анализ. Для описания выборок использовались робастные характеристики: медиана, квартили. Для сравнения значимости и направленности различий парных выборок – критерий Вилкоксона. Принятый уровень значимости равнялся 0.05. Для визуализации взаимосвязей различных состояний исследуемых мышц использовался силовой алгоритм Фрухтермана–Рейнгольда [8], разновидность метода имитации отжига для поиска глобального оптимума функции – исходя из представления о взаимодействии мышц-сгибателей и разгибателей, направленном при развитии адаптации или обучения на минимизацию усилий (достижение оптимума функции). Для статистической обработки данных, подготовки таблиц и графиков использовались программы MS Excel 2010; SPSS 13.0, построение графа – Gephi 0.9.2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обобщенная динамика максимальной амплитуды ЭМГ исследуемых мышц добровольцев при обхвате рукояти (“сжатие”) в последовательных сеансах. На рис. 2 представлены обобщенные групповые характеристики – медианы и интерквартильный размах значений максимальной амплитуды ЭМГ мышц обеих рук при выполнении задачи каждого сеанса (“сжатие”).

Для поверхностного сгибателя пальцев правой руки статистически значимые отличия максимальной амплитуды во всей группе при сравнении выборок (рис. 3) наблюдались только между 1 и 2 целевыми сеансами – снижение, $p = 0.006$. Аналогично и для левой руки, $p = 0.04$. То есть, наиболее отчетливые изменения здесь происходили после первого целевого сеанса.

Для разгибателя пальцев значимые отличия максимальной амплитуды во всей группе есть только для правой руки в 3-м сеансе относительно 2-го: отрицательный сдвиг, $p = 0.017$.

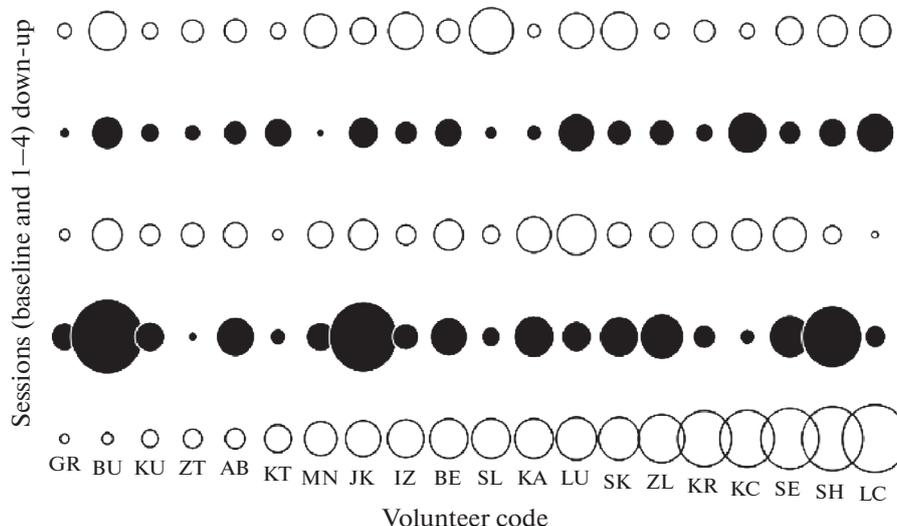


Рис. 3. Изменения максимальной амплитуды ЭМГ поверхностного сгибателя пальцев правой руки добровольцев выборки, где диаметр пузырька пропорционально отображает абсолютное значение показателя.

Fig. 3. Maximum EMG amplitude changes shown for the superficial flexor of the right hand fingers, with the bubble diameter proportionally indicating the absolute values.

Для короткого сгибателя большого пальца кисти – значимые различия для правой руки во 2-ом сеансе относительно 1-го: отрицательный сдвиг, $p = 0.015$; для левой также во 2-ом сеансе относительно 1-го: отрицательный сдвиг, $p = 0.025$, и между сеансами 4 и 3: положительный сдвиг, $p = 0.035$.

Для длинного разгибателя большого пальца – значимые различия только для правой руки во 2-ом сеансе относительно 1-го: отрицательный сдвиг, $p = 0.009$.

Отличия режима управления при обхвате рукояти в целевых сеансах от фонового “сжатия” по максимальной амплитуде ЭМГ исследуемых мышц. При выполнении целевых сеансов 1–4 для поверхностного сгибателя пальцев левой руки в группе не наблюдалось статистически значимых отличий максимальных амплитуд ЭМГ от “пустого” сжатия в фоне, а для правой руки отличия проявились, начиная со второго целевого сеанса (порядок сеансов представлен также на рис. 2). Так, по сравнению с фоном в сеансе 2 – отрицательные сдвиги, $p = 0.003$; в сеансе 3 – отрицательные сдвиги, $p = 0.001$; в сеансе 4 – отрицательные сдвиги, $p = 0.011$. Проведены аналогичные сравнения для разгибателя пальцев: на правой руке значимые отличия от фона проявились в сеансе 3 – отрицательные сдвиги, $p = 0.001$; на левой руке отличия тоже проявились в сеансе 3 – отрицательные сдвиги, $p = 0.04$, в сеансе 4 – отрицательные сдвиги, $p = 0.037$. Далее, для короткого сгибателя большого пальца кисти: на правой руке отрицательные сдвиги в сеансе 3 при $p = 0.021$ и в сеансе 4 при $p = 0.017$; а на левой руке значимых отличий не было. И, для длинного разгибателя большого пальца: на правой руке – отрицательные сдвиги в сеансе 2 ($p = 0.007$), в сеансе 3 ($p = 0.02$) и в сеансе 4 ($p = 0.001$); а для левой руки значимых отличий не было.

Влияние процедуры в целом (сеанса) на максимальную амплитуду ЭМГ исследуемых мышц – сравнение значений при свободном обхвате (“расслабление”) рукояти до и после сеанса. Активность во время фонового сеанса не вызывала в группе испытуемых быстрых изменений показателя максимальных амплитуд ЭМГ вследствие

выполнения “пустой” задачи, что подтверждалось отсутствием статистически значимых различий значений в парных выборках (соответствующих сеансу, правой или левой руке, исследуемой мышце) в условиях свободного обхвата рукоятки силового джойстика (“расслабление”), при принятом уровне значимости. Аналогично – в первый целевой сеанс. В целевом сеансе 2 наблюдались статистически значимые различия значений этого показателя для поверхностного сгибателя пальцев правой руки (отрицательный сдвиг, $p = 0.006$) и для короткого сгибателя большого пальца кисти левой руки (отрицательный сдвиг, $p = 0.012$). В целевом сеансе 3 различия обнаружены при сравнении показателей для короткого сгибателя большого пальца кисти левой руки (отрицательный сдвиг, $p = 0.001$). В целевом сеансе 4 значимые различия обнаружены при сравнении парных выборок значений для разгибателя пальцев правой руки (отрицательный сдвиг, $p = 0.04$) и для поверхностного сгибателя пальцев левой руки (отрицательный сдвиг, $p = 0.011$).

Индивидуальная динамика максимальной амплитуды ЭМГ исследуемых мышц при обхвате (“сжатие”) рукоятки в последовательных сеансах. Достаточно контрастным примером изменений показателя активности исследуемых мышц в течение целевых сеансов могут служить динамики индивидуальных параметров с поверхностного сгибателя пальцев правой руки – иллюстрация выбрана, исходя из обобщенных групповых характеристик и сравнений, представленных на рис. 2, блок А и в описании выше. На рис. 3 отображены индивидуальные изменения для всех добровольцев – диаметр пузырьков соответствует значению максимальной амплитуды ЭМГ данной мышцы.

Применяемая здесь с некоторой долей условности проверка наличия тренда в индивидуальных изменениях показателя (для значений каждого испытуемого – критерий серий) всех исследуемых мышц, подтверждает здравое заключение, что изменение здесь связано с конкретной деятельностью, обусловленной выполнением инструкции, а получаемые значения независимы, наблюдаемые изменения нелинейны. Это справедливо для показателей всех исследуемых мышц у всех добровольцев. При наличии в выборке разных типов динамики максимальной амплитуды ЭМГ (примеры на рис. 3), следует в целом выделить наиболее интенсивное изменение характера управления исследуемыми мышцами по максимальной амплитуде ЭМГ с 1-го на 2-й или со 2-го на 3-й сеансы, выражающееся преимущественно в уменьшении показателя, что можно отметить в качестве наиболее общей характеристики.

Соотношения изменений максимальной амплитуды ЭМГ разных исследуемых мышц при обхвате (“сжатие”) рукоятки в последовательных сеансах. Индивидуальный пример (код добровольца GR) представлен на рис. 4 в виде силового графа, где расположение узлов определяется силами, которые объединяют узлы и раздвигают их. Показатели для каждой мышцы за все сеансы наблюдения выделены цветом (узлы и ребра графа), а буквой “s” (сеанс) и номером отмечены последовательные целевые сеансы.

Статистика графов: число узлов – 20, число ребер – 16; количество связей узла, разделенное на общее количество связей в графе (средняя взвешенная степень) – 0.8; отношение числа ребер к максимально возможному (плотность) – 0.042; соотношение плотности связей внутри группы при заданном разбиении графа на группы с плотностью связей между группами (модулярность) – 0.75.

Более плотное расположение узлов в фоне для правой руки соответствует большей скоординированности сгибателей и разгибателей по сравнению с левой рукой. То есть, в использованной силовой модели силы притяжения и отталкивания уравновесились при более компактном расположении вершин. Аналогичное, более компактное расположение вершин для правой руки наблюдалось и при последующих сеансах (s.1-4 для исследуемых мышц на рис. 4).

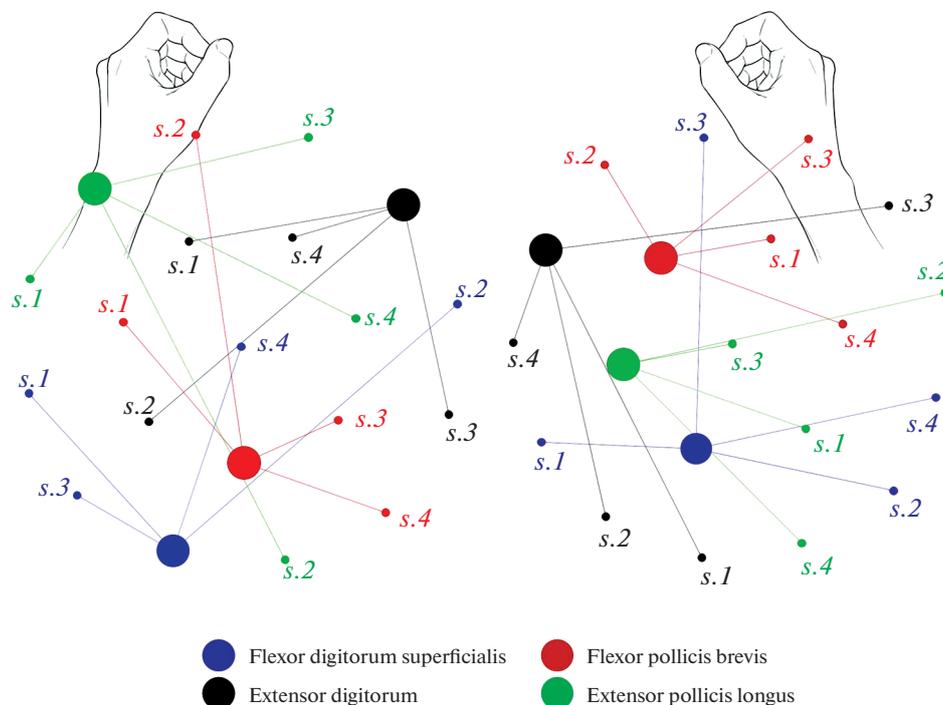


Рис. 4. Смешанные ориентированные графы по силовому алгоритму Фрухтермана–Рейнгольда по значениям максимальной амплитуды ЭМГ исследуемых мышц (выделено цветом) каждой руки (левая и правая отмечены условными изображениями) в последовательных сеансах, где более крупные узлы соответствуют фоновому сеансу, а целевые сеансы отмечены s.1-4.

Fig. 4. Mixed directed graphs according to the Fruchterman-Reingold force algorithm for the maximum EMG amplitude values of the studied muscles (indicated by different colors) for each hand (left and right hands are indicated by corresponding images) in successive sessions, with the larger nodes indicating the baseline session, and the target sessions marked by s.1-4.

Анализ индивидуальных соотношений (пример на рис.4) и обобщенных (групповых) соотношений, представленных на рис. 2 и в описании выше, указывает на различия в адаптациях правой и левой рук испытуемых, проявляющиеся в естественно большей для правшей координированности мышц правой руки и более быстрой адаптации к стандартной задаче управления силовым джойстиком. Различия мышц-сгибателей и мышц-разгибателей на обеих руках проявлялись в больших значениях максимальных амплитуд ЭМГ и более выраженным сдвигом к снижению показателей от фона в направлении последующих сеансов для сгибателей.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Особенностью проведенного наблюдения был режим движений, весьма близкий к изометрической активности ручных мышц. То есть, наблюдалась ситуация, когда силовое воздействие на неподвижную рукоять управления происходило при почти постоянной или мало меняющейся длине мышц из-за ограниченной условиями подвижности управляющей руки. Для реализации управления было необходимо прикладывать определенную (минимальную) силу в соответствии с параметрами силового джойстика, что, вероятно, могло в какой-то мере способствовать некото-

рому “выравниванию” активности мышц. Такая ситуация соответствует типичным условиям ручного управления каким-либо техническим устройством или системой. В наблюдении требовались достаточно точные, но довольно слабые и кратковременные усилия, чтобы можно было говорить о типичных механизмах развития мышечных адаптаций [5]. При этом сравнение значений максимальной амплитуды ЭМГ исследуемых мышц в последовательных сеансах указывает на отличия, которые, вероятно, можно трактовать как изменения порогов [9], что может помочь в объяснении нелинейности изменений. Или, иначе, можно предположить, что нейроны моторной коры максимально чувствительны к “предпочтительным” направлениям движений рук и постепенно уменьшают активность при отклонениях от этих направлений [10], что также возможно связать с теорией функциональных систем П.К. Анохина. На динамические изменения эфферентной сигнализации даже в краткосрочном курсе кратких занятий, принятых в нашем наблюдении, указывают сравнения электрической активности мышц рук при внешне похожих, но отличающихся наличием или отсутствием задачи управления фоновым и целевыми сеансами. На наш взгляд, наблюдавшиеся отрицательные сдвиги значений максимальной амплитуды ЭМГ в ходе наблюдения, могут отражать когнитивные аспекты управления, например, описываемые иногда также как визуально-моторная адаптация, существующая даже в отсутствие обучения — результат взаимодействия между явным обучением, управляемым целевой ошибкой, и неявным изучением прямой модели, управляемой ошибкой прогнозирования [11]. Учитывая наличие визуального канала обратной связи и его несомненное влияние на наблюдаемые изменения активности мышц [12], а также другие исследования направления, где предполагается, что координация движений не оптимизируется на уровне отдельных мышц, а происходит системно, связываясь с фактическим положением конечности, иерархической схемой управления [13], можно отметить, как полагаем, полезность полученных нами данных для развития системных представлений о регуляции функции. Это можно рассматривать, например, в контексте разработки метода для обучения нейронных декодеров прогноза активации мышц, где линейный декодер учитывал бы вклад каждого нейронного блока в погрешность прогнозируемой ЭМГ по сравнению с предварительно определенным оптимальным значением для соответствующего целенаправленного усилия [14], или в контексте разработки теорий моторного контроля [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнение добровольцами даже нескольких кратких заданий по визуальному управлению с обратной связью путем приложения силы к статичному контроллеру (рукоятки) сопровождалось развитием мышечных адаптаций, которые проявлялись преимущественно в снижении максимальной амплитуды ЭМГ исследуемых мышц руки в течение 2–3 сеансов из 5, с учетом первого контрольного сеанса (фона). Активность во время фонового сеанса не вызывала в группе испытуемых быстрых изменений показателя максимальных амплитуд ЭМГ вследствие выполнения “пустой” задачи, что отличало внешне похожие усилия при выполнении задачи целевых сеансов — тем самым, дополнительно подтверждая здесь различия в механизмах обеспечения движений, роль постановки цели поведения. Для мышц-сгибателей наблюдался более выраженный отрицательный сдвиг значений показателей от фона в направлении последующих целевых сеансов, чем для мышц-разгибателей. Индивидуальный и групповой анализ указывают на важную роль конфигурации активностей в электромиограмме, отражающей взаимодействия различных мышц руки для выполнения целенаправленного поведения — ручного управления объектом на экране.

Наблюдение выполнялось в рамках комплексного проекта по изучению регуляции движений человека, что предполагает дальнейшее развитие и преодоление возможных ограничений, обусловленных применением одной описанной методики. Авторы будут признательны вниманию коллег, предложениям и конструктивной критике.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Финансирование осуществлено в рамках плановой работы ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» и ФГБНУ «НИИ нормальной физиологии имени П.К. Анохина». Поддержано грантом Государственного совета Республики Крым для молодых ученых на 2019 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zecca M., Micera S., Carrozza M.C., Dario P. Control of Multifunctional Prosthetic Hands by Processing the Electromyographic Signal. *Crit. Rev. Biomed. Eng.* 2017; 45(1–6): 383–410. <https://doi.org/10.1615/CritRevBiomedEng.v45.i1-6.150>
2. Pirondini E., Coscia M., Marcheschi S., Roas G., Salsedo F., Frisoli A., Bergamasco M., Micera S. Evaluation of the effects of the Arm Light Exoskeleton on movement execution and muscle activities: a pilot study on healthy subjects. *J. Neuroeng. Rehabil.* 2016 Jan. 23; 13: 9. <https://doi.org/10.1186/s12984-016-0117-x>
3. Kim G.J., Taub M., Creelman C., Cahalan C., O'Dell M.W., Stein J. Feasibility of an Electromyography-Triggered Hand Robot for People After Chronic Stroke. *Am. J. Occup. Ther.* 2019 Jul/Aug; 73(4): 7304345040p1–7304345040p9. <https://doi.org/10.5014/ajot.2019.030908>
4. Гроховский С.С., Кубряк О.В. К вопросу о “дозе” двигательной реабилитации после инсульта: обзор. *Физиотерапия, бальнеология и реабилитация.* 2018 17(2): 66–71. S.S., Kubryak O.V. To the question of the dose a motor rehabilitation after a stroke: a review. *Phsiotherapy, balneology and rehabilitation.* 2018 17(2): 66–71. <https://doi.org/10.18821/1681-3456-2018-17-2-66-71> [In Russ]. <https://doi.org/10.18821/1681-3456-2018-17-2-66-71> [Grokhovskiy]
5. Wisdom K.M., Delp S.L., Kuhl E. Use it or lose it: multiscale skeletal muscle adaptation to mechanical stimuli. *Biomech. Model Mechanobiol.* 2015 Apr.; 14(2): 195–215. <https://doi.org/10.1007/s10237-014-0607-3>
6. Мулюха В.В., Заборовский В.С., Попов С.Г. Управление группировкой нанпланетных роботов в супервизорном режиме с борта орбитальной станции. *Робототехника и техническая кибернетика.* 1(14): 55–60. 2017. [Milyukha V.V., Zaborovskiy V.S., Popov S.G. Controlling a group of alien robots in Supervisory mode from the orbital station. *Robotics and Technical Cybernetics.* 1(14): 55–60. 2017. (In Russ)].
7. Beck T.W., Housh T.J., Johnson G.O., Cramer J.T., Weir J.P., Coburn J.W., Malek M.H. Does the frequency content of the surface mechanomyographic signal reflect motor unit firing rates? A brief review. *J. Electromyogr. Kinesiol.* 17(1): 1–13. 2007.
8. Fruchterman T.M.J., Reingold E.M. Graph drawing by force-directed placement. *Software: Practice and Experience.* 21(11): 1129–1164. 1991.
9. Foisy M., Feldman A.G. Threshold control of arm posture and movement adaptation to load. *Exp. Brain Res.* 175(4): 726–744. 2006.
10. Feldman A.G. Indirect, referent control of motor actions underlies directional tuning of neurons. *J. Neurophysiol.* 2019 Mar. 1; 121(3): 823–841. <https://doi.org/10.1152/jn.00575.2018>
11. Taylor J.A., Krakauer J.W., Ivry R.B. Explicit and implicit contributions to learning in a sensorimotor adaptation task. *J. Neurosci.* 2014 Feb.19; 34(8): 3023–32. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3619-13.2014>
12. Hinder M.R., Tresilian J.R., Riek S., Carson R.G. The contribution of visual feedback to visuomotor adaptation: how much and when? *Brain Res.* 2008 Mar. 4; 1197: 123–34. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2007.12.067>
13. de Rugy A., Loeb G.E., Carroll T.J. Muscle coordination is habitual rather than optimal. *J. Neurosci.* 2012 May 23; 32(21): 7384–91. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5792-11.2012>
14. Ethier C., Acuna D., Solla S.A., Miller L.E. Adaptive neuron-to-EMG decoder training for FES neuroprostheses. *J. Neural. Eng.* 2016 Aug.; 13(4): 046009. <https://doi.org/10.1088/1741-2560/13/4/046009>
15. Latash M.L., Levin M.F., Scholz J.P., Schönner G. Motor control theories and their applications. *Medicina (Kaunas).* 46(6): 382–392. 2010.

Electromyogram Maximum Amplitudes in Arm Flexors and Extensors in Healthy Volunteers in a Series of the Power Joystick Control Training Sessions**E. R. Dzheldubaeva^{a,*}, E. A. Biryukova^a, S. A. Makhin^a, N. D. Babanov^b,
E. N. Chuyan^a, and O. V. Kubryak^b**^a*Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia*^b*Anokhin Research Institute of Normal Physiology, Moscow, Russia***e-mail: delviza@mail.ru*

The development of the new models of muscular adaptation in humans that is in high demand today, or finding the solutions to applied problems, such as determining the optimal dosages and modes of motor rehabilitation, provide the need for complex studies of the physiological mechanisms of motor control. Here, we observed 20 healthy right-handed volunteers participating in a series of 4 main and 1 control sessions in the course of 5 consecutive days. Each main session involved the execution of a simple task: to continuously control the marker on the screen placed in front of them by applying force to the stationary handle (power joystick) using their right and left hands while maintaining the proper elbow position. The aim for the presented part of the complex project was to examine the electromyographic activity in flexor and extensor finger muscles (superficial flexor, extensor, and thumb long extensor and short flexor) in both hands, in order to find the markers of muscle adaptation within a short course series of brief training sessions of deliberate control by manual force application. The analysis of individual and group characteristics points at the importance of the configuration and of the level of activity (interaction) distribution in the examined muscles for the development of adaptation, and reveals the differences in the activity of right and left hand muscles. The differences between the flexor and extensor muscles in both hands manifested in the larger values of the maximum EMG amplitudes, and a more pronounced trend of their decrease with each subsequent main session relative to the control condition, for the flexor muscles. These changes were non-linear.

Keywords: muscle adaptation, hand muscle electrical activity, control of hand movements, static and low-amplitude hand movements, flexors and extensors, electromyogram maximum amplitude, power joystick

ЦИТИРОВАТЬ:

Джелдубаева Э.Р., Бирюкова Е.А., Махин С.А., Бабанов Н.Д., Чуюн Е.Н., Кубряк О.В. Максимальная амплитуда электромиограмм сгибателей и разгибателей рук в серии сеансов управления силовым джойстиком у здоровых добровольцев. Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 106(1): 44–54.

DOI: 10.31857/S0869813920010069

TO CITE THIS ARTICLE:

Dzheldubaeva E.R., Biryukova E.A., Makhin S.A., Babanov N.D., Chuyan E.N., Kubryak O.V. Electromyogram Maximum Amplitudes in Arm Flexors and Extensors in Healthy Volunteers in a Series of the Power Joystick Control Training Sessions. Russian Journal of Physiology. 106(1): 44–54.

DOI: 10.31857/S0869813920010069