

**ДИНАМИКА ПАРАМЕТРОВ МАЛОАМПЛИТУДНЫХ ДВИЖЕНИЙ РУК
ПРИ ПОВТОРЯЮЩЕЙСЯ ДВИГАТЕЛЬНО-КОГНИТИВНОЙ ЗАДАЧЕ**

© 2020 г. Н. Д. Бабанов^{1, *}, Е. А. Бирюкова², Э. Р. Джелдубаева²,
С. А. Махин², Е. Н. Чуян², О. В. Кубряк¹

¹Научно-исследовательский институт нормальной физиологии им. П.К. Анохина,
Москва, Россия

²Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Россия

*E-mail: n.babanov@nphys.ru

Поступила в редакцию 11.05.2020 г.

После доработки 20.07.2020 г.

Принята к публикации 08.09.2020 г.

В отличие от развития мышечных адаптаций, связанных с перенапряжением, недостаточным растяжением, перегрузкой и недогрузкой, небольшие по длительности курса и нагрузке двигательно-когнитивные тренировки вызывают адаптации, связываемые с нервными перестройками, исследование которых представляет большой интерес. При этом данное направление остается недостаточно исследованным, на что указывают, например, эмпирический подбор режима двигательной активности при медицинской реабилитации, сложности построения прогноза и оценки реабилитационного потенциала. 25 здоровым предварительно обученным добровольцам предлагалось с помощью усилия руки на неподвижный джойстик управлять меткой на экране с целью исследования степени выполнения инструкции и силовых характеристик малоамплитудных управляющих движений. С помощью закрепленного на силовой платформе джойстика оценивались параметры траектории центра давления на опору, вертикальная сила и внешний результат (степень выполнения инструкции по средней длительности отработки единичного результата) при выполнении стандартной задачи со зрительной обратной связью, выполняемой трехкратно каждой рукой, последовательно в течение 4 дней (краткого курса тренировок). Полученные данные анализировались стандартными математическими методами. Наиболее быстро, уже ко 2-му сеансу, достигался стабильный уровень выполнения инструкции. При этом оптимизация силы вертикального надавливания происходила в течение всего курса, а оптимизация управления в плоскости опоры имела более сложный характер. Условно “оптимизация” моторного контроля (для данного периода наблюдения), адаптивные процессы происходили неравномерно для условно различных аспектов управления: достижения оптимальной результативности, выбора вертикального усилия и манипулирования усилием в плоскости опоры. Быстрое улучшение результатов выполнения инструкции предположительно связано с оптимизацией стратегии. Более сложной представлялась задача оптимизации вертикального усилия на джойстик, а наиболее сложной – управление силой рук в плоскости опоры, что может быть связано с отношением этого к более поздней стадии обучения.

Ключевые слова: моторный контроль, мануальное управление, малоамплитудные движения, обучение, мышечные адаптации, двигательно-когнитивная задача, функциональная система

DOI: 10.31857/S0869813920110035

Актуальная физиологическая проблема – исследование быстрых адаптивных процессов сложной системы моторного контроля (например, [1, 2]). Хорошо известны мышечные адаптации при механической нагрузке, которые базируются на

четырёх аспектах: перенапряжение, недостаточное растяжение, перегрузка и недогрузка [3]. Например, на макроуровне – в ответ на перегрузку мышца увеличивает площадь поперечного сечения, чтобы компенсировать величину перегрузки, а в субклеточном масштабе происходит добавление саркомеров, которые образуют дополнительные миофибриллы для увеличения общей площади поперечного сечения мышцы – наиболее выражено это происходит в течение примерно 10 недель. Или, в контексте постепенного прироста саркомеров в ответ на хроническое растяжение – число саркомеров постепенно увеличивается, чтобы уменьшить растяжение саркомера и перевести мышцу в оптимальный режим работы, примерно в течение 10–15 дней [3]. Иными словами, адаптивные процессы такого рода не мгновенны и обычно предполагают наличие воздействий на мышцу в течение определенного времени, а в реальной практике длительность курса тренировок и сами отдельные занятия могут занимать относительно небольшое время, иметь малую нагрузку и число повторений. Например, общая длительность двигательной реабилитации стационарного этапа постинсультного восстановления сегодня обычно составит 10–30 ч за весь курс [4]. Число двигательно-когнитивных тренингов, не предполагающих большой нагрузки на мышцы, на стационарном этапе может составлять 8–10 достаточно кратких (несколько минут) занятий [5]. Нагрузка на мышцы здесь обычно относительно невелика, учитывается состояние, возможности пациента. Иными словами, достижение целевой функциональности (моторного контроля) на достаточно кратком отрезке времени, вероятно, достигается не столько за счет обычно исследуемых мышечных адаптаций, сколько за счет нервных перестроек, изменений в системе управления движением, обучения [6].

На наш взгляд, рассмотрение развивающихся адаптаций как проявления активности сложных систем, чья регуляция часто не сводится к мышечным перестройкам, представляет до сих пор недостаточно оцененный исследователями ресурс. Это касается давних системных представлений, получивших большое развитие в отечественной физиологической школе, и также развиваемой нами (в том числе, [6]). Например, по П.К. Анохину (1955), в контексте “общих принципов компенсации” предлагаются следующие принципы: (1) “принцип сигнализации дефекта”; (2) “принцип прогрессивной мобилизации компенсаторных механизмов”; (3) “принцип непрерывного обратного афферентирования компенсаторных приспособлений”; (4) “принцип санкционирующей афферентации”; (5) “принцип относительной устойчивости компенсаторных приспособлений” [7]. Какие тонкие физиологические механизмы лежат в основе принципов “компенсации”, в том числе, вне “дефекта”? На наш взгляд, вопрос и сегодня остается актуальным. Не только для медицинской реабилитации или спорта, но в других сферах при обучении тонким ручным операциям, например, при подготовке врачей-эндоскопистов [8]. Следует отметить, что сам П.К. Анохин указывал, что “...на ряде экспериментальных моделей было показано отсутствие какого-либо принципиального отличия между аппаратами и механизмами, включающимися при любом затруднении функции в нормальных условиях, и аппаратами и механизмами, включающимися при нарушении функций в результате травмы, болезни или оперативного вмешательства. Этим обобщением закрывается пропасть между понятием “пластичности”, очень часто применяемым к изменчивости функций нормального организма, и понятием компенсации, имеющим преимущественное распространение при оценке патологических нарушений функций. Установление принципиального единства между этими областями изменения функций совершенно понятно на физиологическом основании” [7].

В этом ключе сегодня проводятся различные исследования, которые могут быть полезны для изучения системных аспектов. Например, рассматриваются различные нейронные механизмы моторного обучения и переноса функциональности к контралатеральной конечности [9]. На периферическом уровне (в исследовании динамики активности мышц-сгибателей и разгибателей рук) ранее описана оптими-

зация моторного контроля, отображенная в изменениях соотношений биоэлектрической активности мышц на одной руке и между правой и левой [10]. Исследуются совместные движения верхних и нижних конечностей, которые рассматриваются в качестве эффективного метода активации нейронных сетей, связывающих генераторы ритмики рук и ног, что также может иметь значение в подготовке восстановительных методик и новых способов оценки моторного контроля.

В прикладном плане острой проблемой остается поиск и отбор концептуальных и конкретных методических решений, с помощью которых можно было бы надежно оценить эффективность, дать прогноз и определить необходимую “дозу” двигательной нагрузки, тренинга, например, в медицинской реабилитации [4]. В случае исследования быстрых приспособительных механизмов перспективным направлением является использование “двойных” двигательно-когнитивных задач (например, по типу оригинального варианта с управлением балансом тела, изучения многозадачности [11]). “Двойные” двигательно-когнитивные задачи, как предполагается, могут быть информативным способом для оценки особенностей когнитивной функции [12], в том числе, в рамках известных концепций параллельной обработки информации с конкуренцией за ресурсы, “бутылочного горлышка” и других [11]. И, в этом контексте, моторные компоненты могут отражать особенности управления, а анализ внешнего результата (выполнения инструкции) – когнитивные характеристики. Распространенный подход для исследований такого направления часто предполагает воздействие рукой на управляющую рукоять, требующее приложения определенной силы (варианты процедур по типу “force field learning”). При этом задаются характеристики рукояти – например, ограничения по числу степеней свободы, оценивается степень выполнения инструкции [12]. Перспективной методикой нам представляется использование полностью неподвижной рукояти – силового джойстика, реагирующего на силу надавливания [6]. Интересным аспектом, обусловленным неподвижностью рукояти, здесь представляется использование только изометрических и малоамплитудных движений испытуемого, поскольку в этом случае результат управляющего действия (эфферентация), вероятно, может быть выделен наиболее точно за счет исключения влияний замахов, инерции и других возможных дополнительных факторов. Кроме того, снижение амплитуды движений или физическая возможность только “обозначений” движения характерно для различной патологии, что придает такому аспекту важный практический смысл. Небольшое число повторений (несколько кратких сеансов управления) в задаче несильного надавливания на неподвижную рукоять минимизирует развитие мышечных адаптаций по типу описанных [13].

С учетом вышесказанного, в описываемой работе перед нами стояла цель с помощью неподвижного силового джойстика исследовать степень выполнения инструкции (внешний результат) в двигательной задаче с визуальной обратной связью и силовые характеристики малоамплитудных управляющих движений (надавливание рукой на джойстик) у группы здоровых добровольцев на протяжении краткого курса, минимизирующего, таким образом, развитие мышечных адаптаций.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

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”, с использованием штатного оснащения и оборудования Центра. 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”.

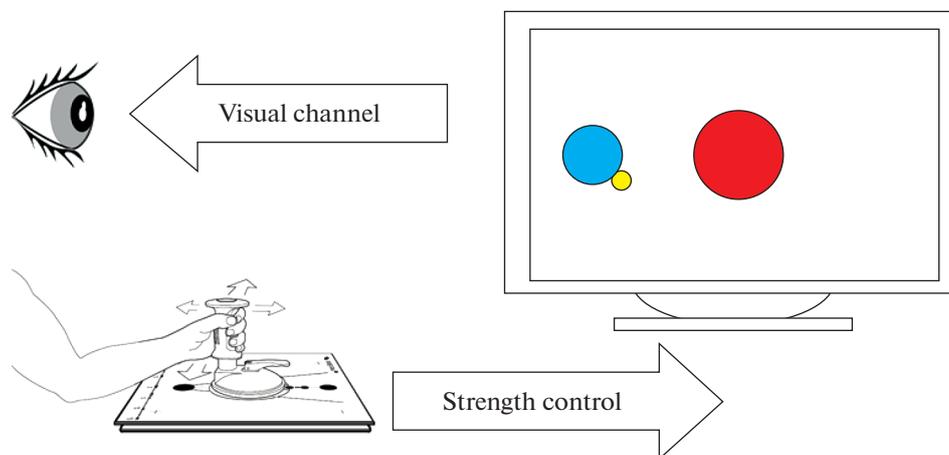


Рис. 1. Условная схема процедуры.
Fig. 1. Conditional scheme of the procedure.

Испытуемые. 25 условно здоровых молодых праворуких мужчин-добровольцев 18–25 лет, студенты университета. Ведущую руку определяли с помощью теста “ведущая рука” [15]. Определение размера выборки – согласно представлениям о достаточности при повторяющихся измерениях.

Оборудование и программное обеспечение. Силовая платформа ST-150 с экраном зрительной обратной связи размером диагонали 24”, под управлением штатной программы STPL, с джойстиком SDB-17 – 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.

Процедура. Испытуемый располагался сидя перед экраном зрительной обратной связи, локоть в стандартном положении, кисть обхватывает рукоятку неподвижного силового джойстика. Согласно инструкции требовалось надавливать на джойстик, который реагировал на силу надавливания, для перемещения метки центра давления на опору сообразно отображаемой на экране ситуации (рис. 1). Кисть руки располагалась на джойстике стандартным хватом, задаваемым формой рукоятки, стандартизированной для всех позиций тела (стол и стул), а также стандартизированной позицией локтя – по разметке на столе. Цель – захватить как можно больше мишеней во время теста. Для реализации процедуры использовался стандартный тест “Динамическая проба” в штатной программе STPL, соответственно ранее описанному [6]. Контроль времени и начало – по голосовой команде компьютерной программы. На экране перед испытуемым (рис. 1) по периметру центрального круга (исходная позиция метки центра давления) появлялись круглые мишени, на которые необходимо наводить метку, производить кратковременное удержание на мишени до ее исчезновения и возвращаться в центральный круг для продолжения (появления новой мишени). Сила надавливания по заданным условиям наблюдения должна была составлять не менее 10 Н для возможности выполнения теста.

Добровольцам после инструктажа и ознакомительного теста проводилось по 1 сеансу в течение 4 последовательных дней недели, в первой половине дня, в стандартизованных условиях, вне ощущений голода, жажды и тому подобное. Один сеанс состоял из 3 одинаковых последовательных минутных тестов для каждой руки (всего 6 тестов для обеих рук), с минутным отдыхом в промежутках.

Анализируемые показатели. В процессе выполнения задачи испытуемым в программе STPL регистрировались вертикальная сила давления на платформу, полная траектория движения центра давления в плоскости опоры, внешний результат (успешность выполнения инструкции). Сила давления на опору – величина, отображающая усредненную за период вертикальную нагрузку на силовую платформу, создаваемую испытуемым при надавливании на джойстик (Р), в Ньютонах (Н). Внешний результат – среднее за период время отработки цельного фрагмента задания, перемещения управляемой метки центра давления от начального положения в центре на мишень до ее исчезновения и возврата в исходную позицию, в секундах (Tr, с). По данным от силовой платформы оценивалась общая длина (в миллиметрах, L, мм) траектории центра давления (статокинезиограммы) за период. Также использовался интегральный параметр статокинезиограммы, рассчитываемый в Джоулях, по общей формуле:

$$A = m \sum_1^n \frac{|Vx_{i+1}^2 - Vx_i^2| + |Vy_{i+1}^2 - Vy_i^2|}{2},$$

где знаком V обозначены соответствующие значения мгновенных скоростей центра давления по обеим осям в плоскости опоры. Данный параметр является исключительно характеристикой статокинезиограммы, рассчитывается с использованием всех измеренных за период дискретных значений координат общего центра давления на плоскость опоры и, в отличие от показателя общей длины статокинезиограммы (L), учитывает еще и ее форму, что повышает чувствительность и точность оценки [17]. В описании использовался интегральный показатель, рассчитываемый как отношение этого параметра к единице времени – миллджоулей в секунду (Av, мДж/с), рассчитываемый в штатной программе STPL.

Статистический анализ. Статистическое описание исследуемых показателей – робастные характеристики: медиана, квартили. Сравнение значимости различий нескольких выборок – непараметрический аналог ANOVA, критерий Фридмана. Сравнение значимости и направленности различий парных выборок – критерий Вилкоксона. Корреляционный анализ выполнен по методу ранговой корреляции Спирмена. Принятый уровень значимости $\alpha = 0.05$. Расчеты, подготовка таблиц и графиков производились в MS Excel 2010 и SPSS 17.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выполнение инструкции. Усредненная по выборке успешность выполнения инструкции, оцениваемая по среднему времени отработки одной мишени за время теста (Tr, с), была близка при выполнении обеими руками – около 0.7–0.8 с. Для выполнения задания левой рукой мода значений показателя Tr из 300 вариантов (12 выполненных тестов у 25 испытуемых) составила 0.78 с, где Me = 0.81 (0.66; 1.11), максимум – 22.48, минимум – 0.47 с. Для правой руки: мода 0.72; Me = 0.78 (0.48; 1.11); максимум – 26.69; минимум – 0.48 с.

На рис. 2 представлена обобщенная групповая характеристика показателя (Tr, с) в исследуемой выборке для обеих рук.

Применение критерия Фридмана указало на значимое различие при анализе подходов испытуемых на протяжении всех сеансов (12 тестов) для левой ($\chi^2 = 118$, $p < 0.001$) и правой руки ($\chi^2 = 58$, $p < 0.001$).

При применении критерия Фридмана внутри сеансов (по 3 теста) значимое различие было получено: для левой руки в 3-м ($\chi^2 = 33$, $p < 0.001$) и 4-м ($\chi^2 = 34$, $p < 0.001$) сеансах; для правой руки в 4-м ($\chi^2 = 7$, $p = 0.029$) сеансе.

Групповая динамика в течение последовательных сеансов – сравнение с результатом (Tr, с) 1-го теста 1-го сеанса соответствующей руки, взятого за 100%, с при-

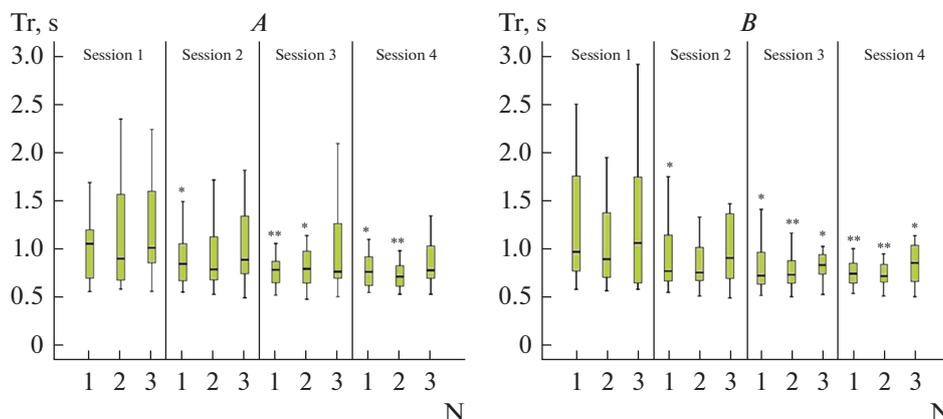


Рис. 2. Обобщенная групповая характеристика выполнения инструкции. “Box Plot” – медиана и квантили (отмечены прямоугольником с меткой), выбросы показателя внешнего результата (Tr, секунды) для левой (A) и правой (B) рук в группе добровольцев. Звездочками отмечены статистически значимые характеристики, одна звездочка – при $\alpha = 0.05$, две – при $\alpha = 0.001$. Вертикальными линиями отделены последовательные сеансы наблюдения (N), где цифрами на горизонтальной оси обозначены порядковые номера выполнения теста.

Fig. 2. Generalized group characteristic of instruction execution. “Box Plot” – median and quartiles (marked with a rectangle with a label), outliers of the external result parameter (Tr, seconds) indicator for the left (A) and right (B) hands in the group of volunteers. Asterisks indicate statistically significant characteristics, one asterisk for $\alpha = 0.05$, and two for $\alpha = 0.001$. Vertical lines separate consecutive observation sessions (N), where numbers on the horizontal axis indicate the ordinal numbers of the test execution.

нятым уровнем значимости $\alpha = 0.05$. Левая рука: в 1-м тесте 2-го сеанса уменьшилось на 6%; в 1-м тесте 3-го сеанса уменьшилось на 13%; в 1-м тесте 4-го сеанса уменьшилось на 16%; во 2-м, 3-м и 4-м сеансах для 2-го теста снизилось на 13, 12 и 21% соответственно; в 3-м тесте 2-го сеанса значимых различий нет; в 3-м тесте 3-го сеанса снижение на 25%; в 3-м тесте 4-го сеанса снижение на 23%. Правая рука: в 1-м тесте сеансов 2, 3 и 4 снижение на 21, 26 и 24% соответственно; во 2-м тесте 2-го сеанса значимых различий нет; во 2-м тесте дней 3 и 4 снижение на 19 и 21% соответственно; в 3-м тесте 2-го сеанса значимых различий нет; в 3-м тесте дней 3 и 4 снижение на 22 и 20% соответственно.

Групповая динамика результативности (Tr, с) в течение одного отдельного сеанса, от 1-го теста соответствующей руки, принятого за 100%, с принятым уровнем значимости $\alpha = 0.05$. Для левой руки: в 1-м и во 2-ом сеансах значимых различий нет; в 1-м тесте 3-го сеанса значимых различий нет; в 3-м тесте 3-го сеанса снижение на 3%; в 4-м сеансе значимых различий нет. Для правой руки: в 1-м сеансе значимых различий нет; во 2-м тесте 2-го сеанса значимых различий нет; в 3-м тесте 2-го сеанса уменьшение на 3%; в 4-м сеансе значимых различий нет.

Таким образом, на основании вышесказанного можно отметить, что при управлении обеими руками в целом здесь достигался близкий результат с лучшими показателями для ведущей (правой). Преимущественно в течение первых двух сеансов наблюдалось некоторое улучшение выполнения соответствующего по порядку исполнения теста испытуемыми, в большей степени стабилизируясь к 3-му сеансу, на уровне, близком для обеих рук. При этом в течение одного сеанса различия в успешности выполнения последовательных тестов (в целом по выборке), как правило, были не так заметны.

Таблица 1. Примеры индивидуальных значений прилагаемой силы (Н)
Table 1. Examples of individual values of applied force (N)

Рука Hand	Левая Left			Правая Right		
Сеанс\Тест Session\Test	1	2	3	1	2	3
Испытуемый КУ Subject KU						
1	49	42	38	39	41	37
2	40	51	40	39	38	38
3	50	40	38	47	43	41
4	49	41	41	52	45	41
Испытуемый ВУ Subject BU						
1	63	49	48	48	49	44
2	81	62	68	84	68	57
3	46	46	42	45	46	43
4	46	40	40	42	42	40

Сила вертикального надавливания рукой на джойстик. В целом по выборке усредненные за период значения вертикальной силы надавливания на джойстик в данных условиях групп варьировались вокруг значения около 40 Н, что, таким образом, можно считать здесь условной нормой. Для левой руки мода значений из 300 вариантов (12 выполненных тестов у 25 испытуемых) составила ровно 40 Н, где $Me = 41$ (39; 45), минимум – 25, максимум – 98 Н. Для правой руки - мода 39 Н, где $Me = 41$ (39; 45), минимум – 30, максимум – 89 Н. В табл. 1 представлены примеры индивидуальных значений анализируемого показателя.

Применение критерия Фридмана указало на значимое различие при анализе подходов испытуемых на протяжении всех сеансов (12 тестов) для левой ($\chi^2 = 48$, $p < 0.001$) и правой руки ($\chi^2 = 51$, $p < 0.001$).

При применении критерия Фридмана внутри сеансов (по 3 теста) значимое различие было получено: для левой руки в 1-м ($\chi^2 = 7$, $p = 0.030$), во 2-м ($\chi^2 = 10$, $p = 0.008$), в 3-м ($\chi^2 = 8$, $p = 0.020$) и 4-м ($\chi^2 = 13$, $p = 0.002$) сеансах; для правой руки в 1-м ($\chi^2 = 9$, $p = 0.009$), во 2-м ($\chi^2 = 27$, $p < 0.000$), в 3-м ($\chi^2 = 15$, $p = 0.001$) и 4-м ($\chi^2 = 11$, $p = 0.005$) сеансе.

Детальное исследование групповой динамики проводилось аналогично сравнениям для внешнего результата, с принятым уровнем значимости $\alpha = 0.05$. Прослеживалась динамика от 1-го сеанса к последующим, по порядковым номерам тестов. Левая рука: для тестов 1 и 2 значимых различий нет; в 3-м тесте для 2-го и 3-го сеансов значимых различий нет; в 3-м тесте 4-го сеанса снижение на 5%. Для правой руки: в 1-м тесте для 2-го и 3-го сеансов значимых различий нет; в 1-м тесте 4-го сеанса снижение на 5%; во 2-м тесте значимых различий нет; в 3-м тесте для 2-го и 3-го сеансов значимых различий нет; в 3-м тесте 4-го сеанса снижение на 2%.

Внутри одного сеанса, относительно 1-го теста, групповая динамика с принятым уровнем значимости $\alpha = 0.05$. Левая рука: есть значимое различие во 2-м тесте 1-го сеанса; в 3-м тесте 1-го сеанса снижение на 2%; во 2-м тесте 2-го сеанса значимых различий нет; в 3-м тесте 2-го сеанса снижение на 11%; в 3-м сеансе значимых различий нет; во 2-м тесте 4-го сеанса значимых различий нет; в 3-м тесте 4-го сеанса есть значимое различие. Для правой руки: во 2-м тесте 1-го сеанса снижение на 4%; в 3-м тесте 1-го сеанса снижение на 7%; во 2-м тесте 2-го сеанса снижение на 2%; в 3-м тесте 2-го сеанса снижение на 5%; во 2-м тесте 3-го сеанса снижение

на 2%; в 3-м тесте 3-го сеанса снижение на 7%; во 2-м тесте 4-го сеанса значимых различий нет; в 3-м тесте 4-го сеанса снижение на 2%.

Анализ групповой динамики указывает, что сила надавливания, как правило, от сеанса к сеансу немного уменьшалась. Внутри одного сеанса преимущественно наблюдалось небольшое снижение силы надавливания к последнему тесту для ведущей (правой) руки. При этом в целом за все проведенные тесты управление ведущей (правой) рукой подразумевало несколько более тонкое управление, что проявлялось в несколько меньших значениях силы надавливания на джойстик (медианные значения для обеих рук приведены выше).

Отображение усилий рук в плоскости опоры. Поскольку общий рисунок движения и рабочее пространство при выполнении двигательной-когнитивной задачи были исходно заданы (программой), то отличия касались особенностей, которые оценивались отдельно по длине (L, мм) статокинезиограммы и по ее интегральной характеристике (A_v , мДж/с). Групповые характеристики показателя L: для левой руки из 300 значений (12 выполненных тестов у 25 испытуемых) $Me = 3056$ (2784; 3541); минимум – 1429; максимум – 8913 мм. Для правой руки: $Me = 3090$ (2769; 3577); минимум – 1931; максимум – 17127 мм. Групповые характеристики показателя A_v : для левой руки из 300 значений (12 выполненных тестов у 25 испытуемых) $Me = 5960$ (4116; 10784); минимум – 1005; максимум – 155056 мДж/с. Для правой руки: $Me = 6422$ (4188; 11134); минимум – 1284; максимум – 345815 мДж/с.

Применение критерия Фридмана указало на значимое различие при анализе подходов испытуемых на протяжении всех сеансов (12 тестов): для левой руки ($\chi^2 = 31$, $p = 0.001$) и правой ($\chi^2 = 48$, $p < 0.001$).

При применении критерия Фридмана внутри сеансов (по 3 теста) значимое различие было получено для левой руки в 3-м ($\chi^2 = 6$, $p = 0.042$) сеансе; для правой руки в 1-м ($\chi^2 = 8$, $p = 0.022$), во 2-м ($\chi^2 = 17$, $p < 0.001$), в 3-м ($\chi^2 = 10$, $p = 0.008$) и 4-м ($\chi^2 = 10$, $p = 0.007$) сеансе.

Дальнейший анализ представлен здесь по показателю A_v , как более контрастному. На рис. 3 представлена обобщенная групповая характеристика показателя в исследуемой выборке для обеих рук.

Описание групповой динамики проводилось аналогично предыдущим, с принятым уровнем значимости $\alpha = 0.05$. Левая рука в 1-м тесте 1-го сеанса – $Me = 4660$ (3961; 9748) мДж/с; со 2-м тестом 1-го сеанса значимых различий нет; в 3-м тесте 1-го сеанса увеличение на 70%; в 1-м и 2-м тесте 2-го сеанса значимых различий нет; в 3-м тесте 2-го сеанса увеличение на 24%; в 3-м сеансе значимых различий нет; в 1-м и 2-м тесте 4-го сеанса значимых различий нет; в 3-м тесте 4-го сеанса увеличение на 78%. Правая рука в 1-м тесте 1-го сеанса – $Me = 5753$ (3861; 12304) мДж/с; во 2-м и 3-м тесте первого сеанса значимых различий нет; в 1-м тесте 2-го сеанса снижение на 38%, в остальных случаях значимых различий нет.

Внутри одного сеанса, относительно 1-го теста, групповая динамика с принятым уровнем значимости $\alpha = 0.05$. Левая рука: во 2-м тесте 1-го сеанса значимых различий нет; в 3-м тесте 1-го сеанса увеличение на 76% ($p < 0.05$); во 2-м тесте 2-го сеанса увеличение на 14%; в 3-м тесте 2-го сеанса увеличение на 3%; во 2-м тесте 3-го сеанса значимых различий нет; в 3-м тесте 3-го сеанса увеличение на 19% ($p < 0.05$); во 2-м тесте 4-го сеанса значимых различий нет; в 3-м тесте 4-го сеанса увеличение на 56%. Для правой руки: в 1-м сеансе значимых различий нет; во 2-м тесте 2-го сеанса увеличение на 80%; в 3-м тесте 2-го сеанса увеличение на 63%; во 2-м тесте 3-го сеанса увеличение на 16%; в 3-м тесте 3-го сеанса увеличение на 67%; во 2-м тесте 4-го сеанса значимых различий нет; в 3-м тесте 4-го сеанса увеличение на 40%.

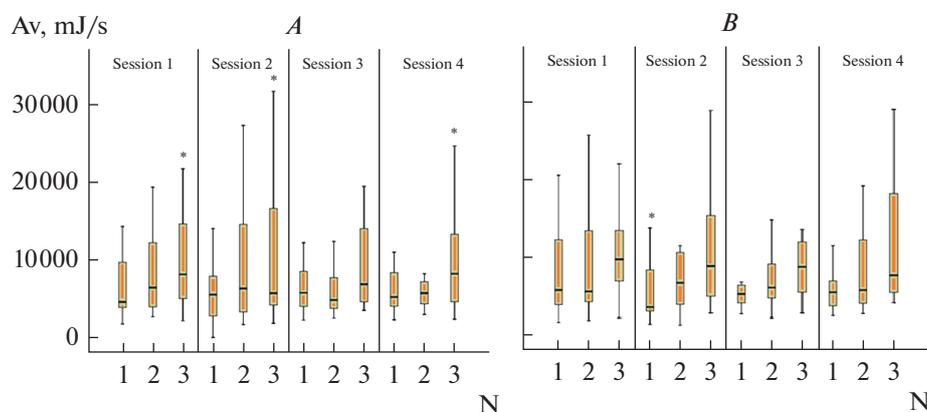


Рис. 3. Обобщенная групповая характеристика управления джойстиком в плоскости силовой платформы. “Box Plot” – медиана и квантили (отмечены прямоугольником с меткой), выбросы интегрального показателя (A_v , мДж/с) для левой (A) и правой (B) рук в группе добровольцев. Звездочкой отмечены статистически значимые характеристики при $\alpha = 0.05$. Вертикальными линиями отделены последовательные сеансы наблюдения, где цифрами на горизонтальной оси обозначены порядковые номера выполнения теста.

Fig. 3. Generalized group characteristic of joystick control in the plane of the force platform. “Box Plot” – median and quartiles (marked with a rectangle with a label), outliers of integral parameter (A_v , MJ/s) for the left (A) and right (B) hands in the group of volunteers. Asterisk indicate statistically significant characteristics, $\alpha = 0.05$. Vertical lines separate consecutive observation sessions, where numbers on the horizontal axis indicate the ordinal numbers of the test execution.

Таким образом, на основании вышесказанного, общую характеристику управления в выборке ведущей (правой) рукой можно охарактеризовать как несколько более энергичную (рис. 3).

Особенности выполнения инструкции. Оценивались взаимосвязи показателей только внутри одного сеанса для одинаковых по порядку тестов, для прямого сопоставления явных, количественно определенных условий (параметров малоамплитудных движений рук).

Значимая (при $\alpha = 0.001$) высокая по шкале Чеддока (>0.7) положительная корреляция между особенностями управляющих движений руки (A_v) и внешним результатом (Tr) наблюдалась преимущественно в первых 2-х сеансах для обеих рук. Следует отметить, что здесь это всегда происходило не для 1-го по порядку теста в сеансе, а только для 2-го или 3-го. Для левой руки таких высоких корреляций было 4 из 6 возможных, еще 1 была средней (>0.5) и 1 незначимой. Для правой руки высоких – 3 из 6 возможных, а остальные 3 – средние. Во второй половине наблюдения (в 3-м и 4-м сеансах) для левой руки наблюдались 4 средние положительные корреляции и 2 незначимые, а для правой руки – 1 высокая (для 3-го теста последнего сеанса), 3 средних и 1 слабая положительные.

Сила вертикального надавливания рукой на джойстик в течение всех сеансов, как правило, отрицательно коррелировала с успешностью выполнения инструкции (Tr). В первом сеансе это было характерно для всех подходов. В целом же, для левой руки: 1 высокая, 5 средних, 2 слабых и 3 незначимых. Для правой руки – 2 высоких, 6 средних, 1 слабая и 2 незначимых.

На рис. 4 представлено схематизированное описание наблюдавшихся взаимосвязей.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экспериментальная схема в данном наблюдении была близка к применяющимся в исследованиях на людях [18] и человекообразных обезьянах [19] вариантам процедуры, представляющей исследование обучения в зрительно-моторной задаче, выполняемой посредством нажатия на рукоять (“force field learning”). В нашем наблюдении применялся полностью неподвижный джойстик, соединенный с силовой платформой, что представляет оригинальную разновидность подобных процедур, отличающуюся возможностью использования для анализа изначально разработанных для стабиллометрии (стабилографии, постурографии) способов оценки траектории “невидимых” усилий руки при изометрических и малоамплитудных движениях, а также применения изначально рассчитанных на использование силовых платформ двигательно-когнитивных задач.

Известно, что поведенческая адаптация происходит быстро даже после единичных ошибок. Временные различия между развитием мышечных адаптаций и процессом улучшения двигательного навыка могут быть значительны. Это представляет большой интерес, например, для медицинской реабилитации. Полагаем, что такие различия исследования их параметров, например, могут быть важны для реабилитационной диагностики, для прогнозов, составления оптимальных режимов тренировок. Возможные физиологические механизмы быстрых адаптаций здесь часто связываются, например, с синаптической, и, на более поздней стадии обучения, с кортикальной [20] пластичностью. Важную роль в успехе зрительно-моторной адаптации может играть выбор стратегии [21], модификация внутренней “карты движений”, двигательного стереотипа [22].

В качестве одного из объяснений подобных быстрых адаптаций в исследовании на нейронных популяциях, например, предполагают, что премоторная кора может управлять быстрой сенсомоторной адаптацией, используя некое “пустое” подпространство (по аналогии с “output-null”) для выходного сигнала на нижележащие области в ответ на детекцию ошибки [19]. Здесь рассматривается представление, что, поскольку нейронов намного больше, чем мышечных клеток, то многие паттерны нейронной активности могут вызывать одинаковую мышечную активность. При этом эфферентные потоки условно связываются с “мощными” или “нулевыми” эффектами, производимыми различными нейронными “подпространствами”. В этом случае, “пустое” подпространство, не оказывая непосредственного влияния на результат моторного регулирования, может быть связано с формированием моделей активности. Подобная концепция также может лежать в объяснении изменения моторного контроля добровольцев в ответ на краткий двигательно-когнитивный тренинг [23], или, в описываемом случае, в изменениях параметров управления движениями рук в течение нескольких последовательных подходов одного сеанса. Соответственно простая оценка малоамплитудных движений рук, подобная предлагаемой здесь процедуре, полагаем, может являться ценной в характеристике особенностей моторного контроля, дифференциации различных состояний человека. Подобные трактовки явно отсылают к давним нейрокибернетическим моделям (например, [24]), теории функциональных систем и другим системным представлениям. П.К. Анохин, комментируя вопросы физиологической компенсации, “нейропластичности” и приспособления, писал, что “механизмы компенсации функций представляют собой в значительной степени то, чего добиваются сторонники кибернетики в решении автоматических устройств” [25]. Гипотетическое представление применительно к данному наблюдению представлено на рис. 5.

Быстрая перестройка характера управления — уменьшение до оптимального к данным условиям значения вертикальной силы надавливания на джойстик и вариативность быстроты (энергичности) перемены вектора силы в плоскости опоры, полагаем, происходила по типу автоматизации, где наличие визуальной обратной

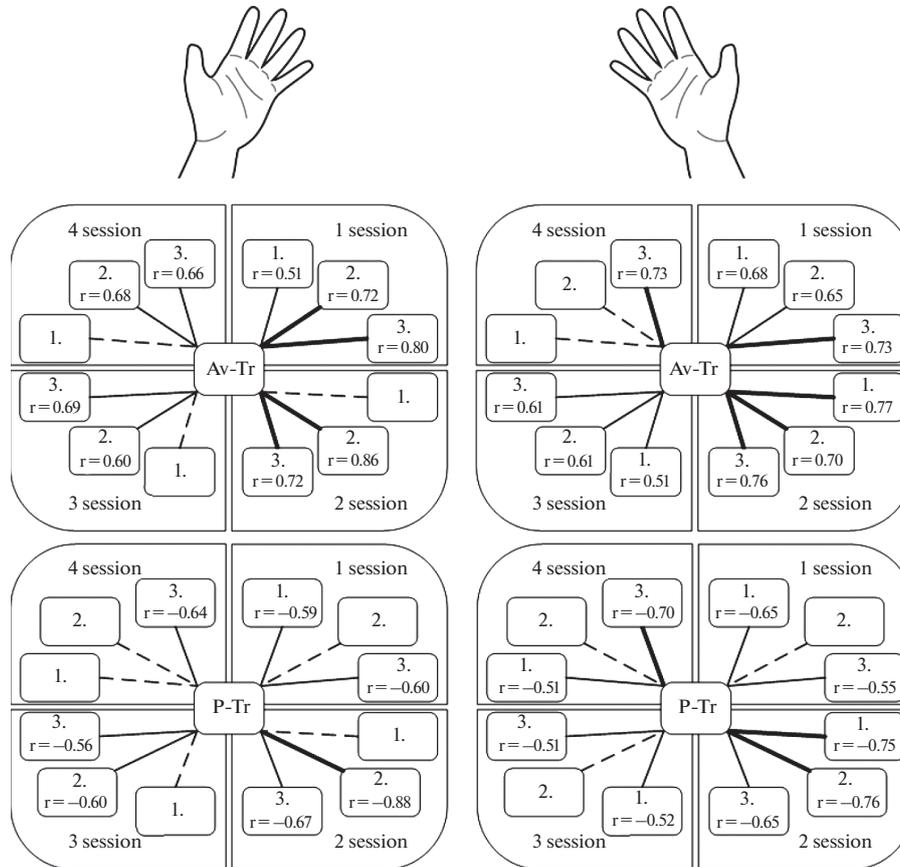


Рис. 4. Схематичное описание взаимосвязей внутри одного теста. Av-Tr – взаимосвязь между особенностями управляющих движений руки и внешним результатом; P-Tr – взаимосвязь между силой вертикального надавливания рукой на джойстик и внешним результатом. Толщина линий соответствует тесноте связи по шкале Чеддока: толстая – высокая сила (>0.7), тонкая – средняя сила ($0.5-0.7$), пунктирная – слабая сила (<0.5).

Fig. 4. Schematic description of relationships within one test. Av-Tr – the relationship between the features of the control movements of the hand and the external result; P-Tr – the relationship between the force of vertical pressure of the hand on the joystick and the external result. The thickness of the lines corresponds to the tightness of the connection on the Chaddock scale: thick – high strength (>0.7), thin – medium strength ($0.5-0.7$), dotted – weak strength (<0.5).

связи обеспечивало быструю детекцию ошибок. В этой связи заслуживает внимания представление, что увеличение скорости обучения на втором сеансе могло быть связано также с преодолением “явных знаний” о выполняемой задаче [25], полученных во время инструктажа и пробного теста, и актуализированных на первом сеансе. Планирование действия в условиях “двойной” двигательнo-когнитивной задачи, полагаем, не сводится только к “чистому” времени реакции, а требует особого “моторного планирования” [26]. Здесь неосознаваемое, неявное обучение базируется на детекции ошибок сенсорного прогнозирования. Данный контекст также допускает точку зрения, что связанное с мозжечком обучение может играть ограниченную роль для приобретения сложных навыков и касается преимуще-

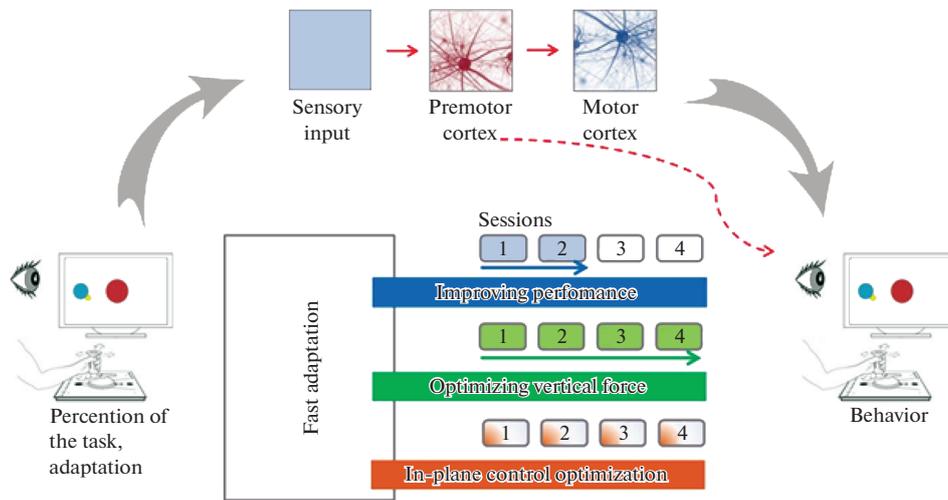


Рис. 5. Схема общих эффектов 4-кратного выполнения двигательно-когнитивной задачи в течение 4 дней с использованием полученных результатов и гипотетического представления о роли премоторной коры [20].

Fig. 5. Diagram of the general effects of performing a 4-time motor-cognitive task for 4 days, including the use of the results obtained and a hypothetical representation of the role of the premotor cortex [20].

ственно “калибровки”, корректировки уже освоенных движений [25]. Иными словами, в развитии подобной предлагаемой экспериментальной модели есть возможность более явно разделить когнитивный и чисто моторный компоненты обучения. На это указывают и полученные в нашем наблюдении сведения о различной динамике результативности (Tr) и характере управляющих воздействий (Av).

На наш взгляд, особенности выполнения инструкции в проведенном наблюдении (рис. 5) также свидетельствуют в пользу высказанных предположений. Следует особо отметить, что более быстрая оптимизация силы надавливания рукой по сравнению с управлением в плоскости силовой платформы, представляет отдельный интересный аспект. Вероятно, что среди возможных причин здесь может быть поза испытуемого, положение руки относительно плоскости управления.

Можно полагать, что оптимизация управления движением рук добровольцев в условиях данного наблюдения происходила неравномерно для условно различных аспектов управления: достижения оптимальной результативности, выбора вертикального усилия и манипулирования усилием в плоскости опоры. Вероятно, быстрое улучшение результатов выполнения инструкции связано с оптимизацией стратегии, наиболее гибкой части управления. Более сложной, вероятно, являлась задача оптимизации вертикального усилия, но это также оказалось достаточно быстрым процессом. Наиболее сложным, полагаем, оказалось управление силой в плоскости опоры, и оптимизация процесса здесь, вероятно, выходит за рамки отмеренного 4-дневного наблюдения – что может быть связано, например, с более поздней стадией обучения [27].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В коротком курсе (4 последовательных сеанса) повторяющихся минутных двигательно-когнитивных тестов у группы здоровых добровольцев наблюдалась отличающаяся динамика для моторных компонентов и успешности выполнения инструкции (внешнего результата). Обими руками в итоге достигался близкий ре-

зультат, с несколько лучшими показателями для ведущей (правой) руки. Наиболее быстро адаптивные процессы происходили в течение первых 2 сеансов, стабилизируясь в части внешнего результата уже к последующим сеансам. Вертикальная сила надавливания на джойстик, как правило, от сеанса к сеансу чаще немного уменьшалась до оптимального в предлагавшихся условиях уровня (около 40 Н), что обычно сопровождалось более энергичным (вероятно, более уверенным) манипулированием. При этом для ведущей руки наблюдалось опережение процессов оптимизации управления малоамплитудным движением.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Бабанов Н.Д. — участие в подготовке наблюдения, расчеты и анализ, подготовка рисунков, участие в подготовке текста, оформление рукописи; Бирюкова Е.А. — участие в планировании и подготовке, привлечение добровольцев и получение информированного согласия, проведение наблюдения, подготовка данных для анализа, обсуждение и участие в подготовке рукописи; Джелдубаева Э.Р. — участие в подготовке и проведении наблюдения, подготовке данных для анализа; Махин С.А. — участие в подготовке и проведении наблюдения, обсуждении и трактовке результатов, подготовке рукописи; Чуян Е.Н. — планирование и координация, участие в разработке схемы наблюдения, подготовка проекта, контроль соблюдения этических норм, мониторинг выполнения, участие в анализе и трактовке данных, подготовке текста; Кубряк О.В. — идея, разработка схемы наблюдения, участие в планировании наблюдения, анализ и трактовка данных, подготовка текста.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

В рамках работы ФГАОУ ВО “Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского” и ФГБНУ “НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина”, согласно Соглашению о сотрудничестве № 13-15/5-2869, 14.02.2017. Также поддержано грантом ФГАОУ ВО “Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского” №АААА-А20-120012090164-8.

БЛАГОДАРНОСТИ

Благодарим за приборное обеспечение директора Центра коллективного пользования “Экспериментальная физиология и биофизика” кафедры физиологии человека и животных и биофизики Таврической академии, к.б.н. К.Н. Туманянц. Выражаем признательность администрациям ФГАОУ ВО “Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского” и ФГБНУ “НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина” за создание творческой атмосферы. Особая благодарность ФГАОУ ВО “Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского” за грантовую поддержку молодых ученых Таврической академии, принявших участие в реализации данного наблюдения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gill J.P., Chiel H.J. Rapid adaptation to changing mechanical load by ordered recruitment of identified motor neurons. *eNeuro*. Apr 22. pii: ENEURO.0016-20.2020. <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0016-20.2020>
2. Takiyama K., Sakurada T., Shinya M., Sato T., Ogihara H., Komatsu T. Larger, but not better, motor adaptation ability inherent in medicated Parkinson’s disease patients revealed by a smart-device-based study. *Sci. Rep.* 10 (1): 7113. 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63717-x>
3. Wisdom K.M., Delp S.L., Kuhl E. Use it or lose it: multiscale skeletal muscle adaptation to mechanical stimuli. *Biomech. Model Mechanobiol.* 14(2): 195–215. 2015. <https://doi.org/10.1007/s10237-014-0607-3>
4. Гроховский С.С., Кубряк О.В. К вопросу о “дозе” двигательной реабилитации после инсульта: обзор. *Физиотерапия, бальнеология и реабилитация.* 17 (2): 66–71. 2018. [Grokhovskiy S.S., Kubryak O.V. To the question of the dose a motor rehabilitation after a stroke: a review. *Physiotherapy, balneology and rehabilitation.* 17 (2): 66–71. 2018. (In Russ)]. <https://doi.org/10.18821/1681-3456-2018-17-2-66-71>
5. Романова М.В., Кубряк О.В., Исакова Е.В., Гроховский С.С., Котов С.В. Объективизация нарушений равновесия и устойчивости у пациентов с инсультом в раннем восстанови-

- тельном периоде. *Анналы клин. и exper. неврологии*. 8(2): 12–15. 2014. [*Romanova M.V., Kubryak O.V., Isakova E.V., Grokhovskii S.S., Kotov S.V.* Objectification of balance and stability disorders in patients with stroke in the early recovery period. *Ann. Clin. Exp. Neurology*. 8(2): 12–15. 2014. (In Russ)].
6. *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. *Neurosci. Behav. Physiol.* 106(1): 44–54. 2020. <https://doi.org/10.31857/S0869813920010069>. 2020
 7. *Анохин П.К.* Общие принципы компенсации нарушенных функций и их физиологическое обоснование. Москва. АПН РСФСР. 1955. [*Anohin P.K.* General principles of compensation for impaired functions and their physiological rationale. Moscow. APS RSFSR. 1955. (In Russ)].
 8. *Khan R., Plahouras J., Johnston B.C., Scaffidi M.A., Grover S.C., Walsh C.M.* Virtual reality simulation training for health professions trainees in gastrointestinal endoscopy. *Cochrane Database Syst. Rev.* 8(8): CD008237. Published 2018. Aug. 17. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD008237.pub3>
 9. *Stöckel T., Carroll T.J., Summers J.J., Hinder M.R.* Motor learning and cross-limb transfer rely upon distinct neural adaptation processes. *J. Neurophysiol.* 116 (2): 575–586. 2016.
 10. *Селионов В.А., Солопова И.А., Жванский Д.С.* Активация межконечностных связей повышает моторный выход в ногах у здоровых испытуемых: исследование в условиях разгрузки рук и ног. *Физиология человека*. 42 (1): 52–63. 2016. [*Selionov V.A., Solopova I.A., Jvanskii D.S.* Activation of inter-limb connections increases motor output in the legs in healthy subjects: a study under conditions of unloading the arms and legs. *Human Physiology*. 42(1): 52–63. 2016. (In Russ)].
 11. *Leone C., Feys P., Moumdjian L., D'Amico E., Zappia M., Patti F.* Cognitive-motor dual-task interference: A systematic review of neural correlates. *Neurosci. Biobehav. Rev.* Apr; 75: 348–360. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.01.010>
 12. *Javoronkova L.A., Maksakova O.A., Shevcova T.P., Moraresku S.I., Kupcova S.V., Kushnir E.M., Iksanova E.M.* Dual objectives are an indicator of the characteristics of cognitive deficits in patients after traumatic brain injury. *Neurosci. Behav. Physiol.* 119 (8): 46–52. 2019. <https://doi.org/10.17116/jnevro201911908146>
 13. *Ohashi H., Valle-Mena R., Gribble P.L., Ostry D.J.* Movements following force-field adaptation are aligned with altered sense of limb position. *Exp. Brain Res.* 237 (5): 1303–1313. <https://doi.org/10.1007/s00221-019-05509-y>
 14. *Wisdom K.M., Delp S.L., Kuhl E.* Use it or lose it: multiscale skeletal muscle adaptation to mechanical stimuli. *Biomech. Model Mechanobiol.* 14 (2): 195–215. 2015. <https://doi.org/10.1007/s10237-014-0607-3>
 15. *Мантрова И.Н.* Методическое руководство по психофизиологической и психологической диагностике. Иваново. Нейрософт. 2007. [*Mantrova I.N.* [Methodological guide for psychophysiological and psychological diagnostics. Ivanovo. Neurosoft. 2007. (In Russ)].
 16. *Baker D.H., Vilidate G., Lygo F.A., Smith A.K., Flack T.R., Gouws A.D., Andrew T.G.* Power contours: optimising sample size and precision in experimental psychology and human neuroscience. arXiv:1902.06122v5 [q-bio.NC] 4 Feb 2020.
 17. *Гроховский С.С., Кубряк О.В.* Метод интегральной оценки эффективности регуляции позы человека. *Мед. техника*. 2: 49–52. 2018. [*Grokhovskiy S.S., Kubryak O.V.* The method of integral assessment of the effectiveness of regulation of human posture. *Biomed. Engineering*. 2: 49–52. 2018. (In Russ)].
 18. *Crevecoeur F., Mathew J., Bastin M., Lefèvre P.* Feedback Adaptation to Unpredictable Force Fields in 250 ms. *eNeuro*. 29.7(2). pii: ENEURO.0400-19.2020. <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0400-19.2020>
 19. *Perich M.G., Gallego J.A., Miller L.E.* A Neural Population Mechanism for Rapid Learning. *Neuron*. 100 (4): 964–976. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2018.09.030>
 20. *Kleim J.A., Hogg T.M., VandenBerg P.M., Cooper N.R., Bruneau R., Remple M.* Cortical synaptogenesis and motor map reorganization occur during late, but not early, phase of motor skill learning. *J. Neurosci.* 24 (3): 628–633. 2004. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3440-03.2004>
 21. *Schween R., Taylor J.A., Hegele M.* Plan-based generalization shapes local implicit adaptation to opposing visuomotor transformations. *J. Neurophysiol.* 120 (6): 2775–2787. 2018. <https://doi.org/10.1152/jn.00451.2018>
 22. *Monfils M.H., Plautz E.J., Kleim J.A.* In search of the motor engram: motor map plasticity as a mechanism for encoding motor experience. *Neuroscientist*. 11 (5): 471–483. 2005. <https://doi.org/10.1177/1073858405278015>
 23. *Kubryak O.V., Gorbacheva A.K., Kovaleva A.V., Panova E.N., Birukova E.A., Grokhovskiy S.S.* A putative marker of functional state shift in volunteers after performing a motor task with biofeedback. *Human Physiology*. 42 (2): 223–227. 2016.
 24. *Брайнес С.Н.* Нейрокибернетика. Москва. Медгиз. 1962. [*Braines S.N.* Neurocybernetics. Moscow. Medgiz. 1962. (In Russ)].

25. Haith A.M., Huberdeau D.M., Krakauer J.W. The influence of movement preparation time on the expression of visuomotor learning and savings. *J. Neurosci.* 35 (13): 5109–5117. 2015. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3869-14.2015>
26. Wong A.L., Haith A.M., Krakauer J.W. Motor Planning. *Neuroscientist.* 21(4): 385–398. 2015. <https://doi.org/10.1177/1073858414541484>
27. Kleim J.A., Hogg T.M., VandenBerg P.M., Cooper N.R., Bruneau R., Remple M. Cortical synaptogenesis and motor map reorganization occur during late, but not early, phase of motor skill learning. *J. Neurosci.* 24(3): 628–633. 2004. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3440-03.2004>

Dynamics of Parameters of Low-Amplitude Hand Movements in a Repetitive Motor-Cognitive Task

N. D. Babanov^{a, *}, E. A. Biryukova^b, E. R. Dzheldubaeva^b, S. A. Makhin^b,
E. N. Chuyan^b, and O. V. Kubryak^a

^aAnokhin Research Institute of Normal Physiology, Moscow, Russia

^bVernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

*e-mail: n.babanov@nphys.ru

In contrast to the development of muscle adaptations associated with overstrain, insufficient stretching, overloading and underloading, low-strain short-term courses of motor-cognitive training lead to adaptations associated with neural rearrangements, which present a great scientific interest. However, this field remains understudied, as indicated by the empirical selection of the mode of motor activity in medical rehabilitation, and the difficulties with forecasting and assessment of the rehabilitation potential. In order to study their ability to follow the instructions, and the power characteristics of low-amplitude control movements, 25 healthy pre-trained volunteers were asked to control the label on the screen by applying pressure to the stationary joystick with their hands. Using a joystick attached to the power platform, the parameters of the trajectory of the center of pressure on the support, the vertical force and the external result (the degree of implementation of the instructions) were evaluated when performing a standard task with visual feedback, performed three times with each hand, sequentially for 4 days (a short training course). The obtained data were analyzed using standard mathematical methods. The stable level of instruction execution was achieved most quickly, by the second session. In contrast, the optimization of the vertical pressure force occurred throughout the whole course, and the optimization of control in the support plane was more complex. Optimization of motor control occurred unevenly for conditionally different aspects of control: achieving optimal performance, choosing a vertical force and manipulating the force in the support plane. The rapid improvement of instructions execution is presumably related to optimizing the strategy. The task of optimizing the vertical force on the joystick was more difficult. The highest difficulty was observed with controlling the strength of the hands in the support plane, which may be explained by the fact that this part of the task was related to a later stage of training.

Keywords: motor control, manual control, low-amplitude movements, training, muscle adaptations, motor-cognitive task, functional system

ЦИТИРОВАТЬ:

Бабанов Н.Д., Бирюкова Е.А., Джелдубаева Э.Р., Махин С.А., Чуян Е.Н., Кубряк О.В. Динамика параметров малоамплитудных движений рук при повторяющейся двигательльно-когнитивной задаче. *Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова.* 106(11): 1370–1384.

DOI:10.31857/S0869813920110035

TO CITE THIS ARTICLE:

Babanov N.D., Biryukova E.A., Dzheldubaeva E.R., Makhin S.A., Chuyan E.N., Kubryak O.V. Dynamics of Parameters of Low-amplitude Hand Movements in a Repetitive Motor-cognitive Task. *Russian Journal of Physiology.* 106(11): 1370–1384.

DOI:10.31857/S0869813920110035