

УДК 612.763+612.062

КОНТРОЛЬ СИЛЫ ХВАТА В ХОДЕ 21-СУТОЧНОЙ “СУХОЙ” ИММЕРСИИ

© 2023 г. И. С. Зеленская¹, *, А. А. Савеко¹, Л. Е. Амирова¹, В. В. Китов¹,
И. Н. Носикова¹, К. А. Зеленский¹, Е. С. Томиловская¹

¹ФГБУН ГНЦ РФ – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

*E-mail: radostniyden@mail.ru

Поступила в редакцию 05.06.2023 г.

После доработки 24.07.2023 г.

Принята к публикации 28.07.2023 г.

Во время космического полета (КП) изменения в функциях верхних конечностей могут повлиять на качество работы оператора. В то же время данных по этой теме очень мало, поскольку большая часть работ сосредоточена на изучении структуры и функций нижних конечностей. Целью настоящей работы явилось исследование характеристик контроля силы хвата при снижении опорных и проприоцептивных сенсорных сигналов в условиях наземного моделирования эффектов КП – “сухой” иммерсии (СИ). Продолжительность воздействия СИ составляла 21 сут. 10 добровольцев мужского пола выполняли тесты с использованием ручного динамометра: на максимальную произвольную силу, удержание целевого усилия, воспроизведение этого усилия по памяти и на градацию силы хвата. Испытуемые выполняли эту серию тестов дважды до воздействия СИ, затем на 1-е, 3-й, 5-е, 10-е, 15-е и 20-е сут СИ, а также на 1-й и 3-й дни восстановительного периода. Результаты показывают, что воздействие СИ сопровождалось увеличением проприоцептивной чувствительности при выполнении задач без зрительной обратной связи, в то время как с открытыми глазами, начиная с 5-х сут СИ, испытуемые чаще ошибались в воспроизведении целевого усилия с использованием доминирующей руки. Нарушение сенсорной обработки/модуляции под влиянием факторов СИ может быть причиной этого феномена.

Ключевые слова: контроль движений, “сухая” иммерсия, космический полет, сила хвата, динамометрия.

DOI: 10.31857/S0131164623600313, **EDN:** EMOMWV

Точное регулирование силы хвата является одним из наиболее сложных примеров высококвалифицированной мелкой моторики [1]. Кроме того, сила хвата должна быть синхронизирована с движениями рук [2–3]. Так, контроль силы хвата зависит от работы многих элементов сенсомоторной системы человека и их взаимодействия. В свою очередь, факторы микрогравитации, в частности отсутствие опоры и аксиальной нагрузки, вызывают развитие спинальной гиперрефлексии [4–6], изменения в порядке вовлечения двигательных единиц [7, 8], снижение мышечного тонуса [9, 10] и скоростно-силовых свойств мышц [11], что приводит к атрофическим процессам в скелетных мышцах [12, 13] и нарушениям точности контроля мышечной силы [14], контроля позы и локомоции [15–19]. Мышцы нижних конечностей наиболее чувствительны к гравитационным переходам [20–23]. Таким образом, нижние конечности чаще являются предметом исследований воздействия микрогравитации по сравнению с верхними. На данный момент требуется больше информации о влиянии отсутствия/снижения опорной аффе-

рентации на верхние конечности, а именно – на качество работы космического оператора руками. Например, в 1997 г. космический корабль “Прогресс 234” столкнулся с космической станцией “Мир” при попытке стыковки. Анализ этого случая выявил негативное влияние факторов космического полета (КП) на операторскую деятельность [24]. Многочисленные исследования демонстрируют изменения в контроле движений рук как в условиях реальной микрогравитации [25–28], так и в условиях, моделирующих ее факторы [29–36].

Цель настоящей работы – исследование характеристик контроля силы хвата при снижении опорных и проприоцептивных сенсорных сигналов в условиях модели физиологических эффектов КП – 21-суточной “сухой” иммерсии (СИ).

В рамках данной работы исследование контроля силы хвата в условиях длительного хронического воздействия СИ было проведено впервые. Данные сведения полезны для понимания возможных рисков при внекорабельной и операторской деятельности [24, 27], особенно в рамках бу-

Таблица 1. Циклограмма исследования характеристик контроля силы захвата

Сутки до начала воздействия (ФОН)				Сутки воздействия “сухой” иммерсии																					Сутки периода восстановления (После)			
−4	−3	−2	−1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	0	1	2	3
v		v		v		v		v					v					v					v			v		v

Примечание: галочками (v) отмечены дни проведения обследования.

душих лунных экспедиций с сопоставимой продолжительностью воздействия. Кроме того, эти данные могут быть полезны для исследований с участием неврологических пациентов с длительным постельным режимом в анамнезе [37].

МЕТОДИКА

Экспериментальная группа включала 10 здоровых мужчин-правшей. Средний возраст участников составлял 29.3 ± 3.56 года, рост – 175.8 ± 0.03 см, а масса тела – 73.24 ± 10.97 кг (среднее значение $\pm SEM$). Критерии включения: индекс

массы тела $<30 \text{ кг/м}^2$, рост ≤ 180 см. Критерии исключения: любые патологии дыхательной, пищеварительной, мочевыделительной, сенсомоторной, кровеносной, нервной и сердечно-сосудистой систем.

Протокол тестирования. Был использован стандартный протокол СИ [38–40]. Важно отметить, что испытуемому разрешалось использовать свои руки для личных нужд (гигиена полости рта, прием пищи и подобное). Согласно протоколу, испытуемые покидали иммерсионную ванну не более чем на 35 мин в день преимущественно в горизонтальном положении (например, для гигиенических или исследовательских процедур). Испытуемые не употребляли алкоголь, продукты, содержащие кофеин, и препараты центрального действия. Погружение в СИ начиналось в 9:00 утра и заканчивалось в 9:00 утра после 21 дня экспозиции (СИ 1–21). График исследования исключал переутомление участников и дополнительные стрессовые факторы. Все тесты требовали отсутствия посторонних шумов. Измерение силы контроля хвата проводили в первой половине дня, по крайней мере, через 1 ч после еды. Измеряли характеристики контроля силы хвата за 4 и 2 сут до погружения (ФОН–4/2), затем на 1-е, 3-и, 5-е, 10-е, 15-е и 20-е сут СИ, а также на 1-й и 3-й дни восстановительного периода (После + 1/3). Схема графика исследования представлена в табл. 1. Экспериментальные сессии, проводимые в течение первых трех дней после СИ, позволяют зарегистрировать острые эффекты СИ, расширяя понимание аналогичных функциональных показателей членов экипажей сразу после КП [36, 37]. Испытуемые выполняли все тесты лежа в иммерсионной ванне. В исследованиях до и после СИ испытуемого погружали в ванну перед началом выполнения тестов. На время тестирования под головой и плечами испытуемого помещали подушку (рис. 1, А). Положение головы и расстояние до экрана были стандартными и контролировались исследователем.

Изометрический датчик в ручном динамометре имеет частоту дискретизации 50 Гц и точность измерения 50 грамм. Динамометр подключали к ноутбуку для обеспечения визуальной обратной связи. Специалисты ГНЦ РФ – ИМБП РАН

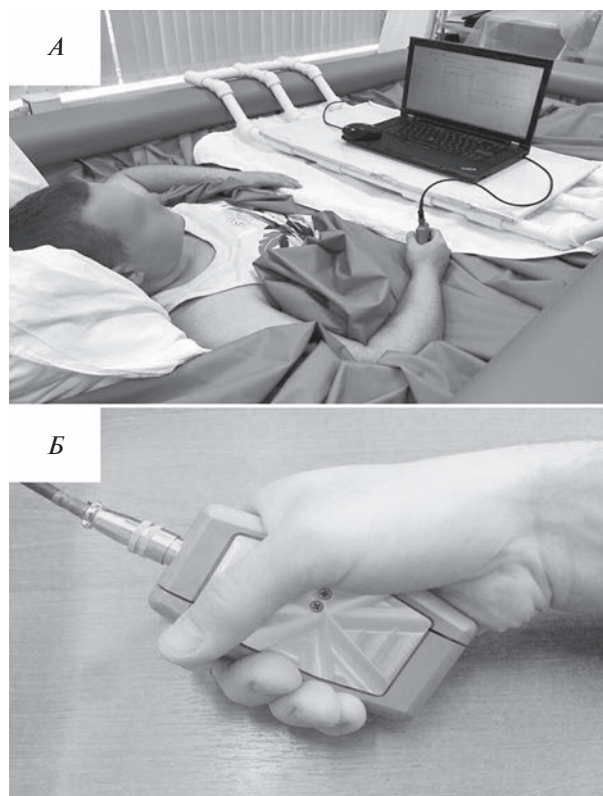


Рис. 1. Испытуемый при проведении тестирования с использованием ручного динамометра в положении лежа в иммерсионной ванне.

А – положение испытуемого при проведении тестирования. Б – ручной динамометр.

(г. Москва) разработали и протестировали на надежность данный динамометр и программное обеспечение для него (рис. 1, Б). Разработку использовали в российско-американском эксперименте “Полевой тест” [41]. Длительное использование этого устройства космонавтами с аналогичным набором тестов было основной причиной выбора оборудования для данного исследования. Это также необходимо для дальнейшего сравнения полученных результатов с данными, полученными после КП. Для записи и обработки данных использовали среду *Matlab*.

Исследование состояло из серии тестов, описанных ниже. Г. Ганчев и др. использовали эту серию тестов для изучения контроля силы хвата у космонавтов после 7-суточного орбитального КП [25]. Описанная последовательность различных заданий во всех тестах всегда была одинаковой. Нагрузки и перерывы в ходе тестирования сводили к минимуму любую усталость во время выполнения задач. Например, *L.A. Jones* и *I.W. Hunter* [42] показали, что мышечная усталость наступает только через 228 с при удержании 35% от среднего значения результатов трех попыток воспроизведения максимальной произвольной силы.

Тест на максимальную произвольную силу. Серия тестов начиналась с определения максимальной произвольной силы хвата (МПС) (рис. 2, А). Испытуемый совершал три сжатия динамометра доминирующей рукой без визуальной обратной связи. Продолжительность интервалов отдыха между попытками не ограничивали. При этом минимальный интервал отдыха составлял 10 с. Значением МПС считали максимальный результат из трех попыток. Среднее значение всех трех попыток воспроизведения МПС принимали за целевое усилие для дальнейших тестов и определяли для каждой экспериментальной сессии.

Тест на удержание целевого усилия. Испытуемый сжимал ручной динамометр доминирующей рукой и удерживал его с силой, максимально близкой к целевому усилию, в течение 15 с. Линии фактической силы удержания и целевого уровня отображались на экране ноутбука и служили визуальным сигналом обратной связи для участника. Затем испытуемый закрывал глаза и продолжал удерживать целевое усилие по памяти в течение 15 с (рис. 2, Б). Для анализа использовали среднее усилие в первые 10 с записи с открытыми глазами и последние 10 с — с закрытыми глазами. Технические неполадки привели к отмене этого тестирования на 10-е сут СИ.

Тест на воспроизведение целевого усилия по памяти. Целевое усилие было таким же, как и в предыдущем тесте — 30% от среднего значения трех попыток МПС. Испытуемый старался максимально точно воспроизвести видимое на экране целевое усилие в ходе 10 следующих друг за

другом кратковременных сжатий динамометра, используя доминирующую руку. Затем испытуемый закрывал глаза и выполнял еще 5 сжатий доминирующей рукой по памяти. После 20–30-секундного перерыва участник повторял 10-кратное воспроизведение видимого целевого усилия доминирующей рукой. Сразу после этого испытуемый закрывал глаза, менял руку на недоминирующую и делал 5 попыток воспроизведения целевого усилия по памяти (рис. 2, В).

Тест на градацию усилия. Испытуемый выполнял серию последовательных сжатий динамометра с закрытыми глазами от минимального усилия до максимального. Задача состояла в том, чтобы каждая следующая попытка превосходила предыдущую с наименьшей разницей (рис. 2, Г). Количество градаций не было ограничено. Участник использовал только доминирующую руку и повторял этот тест 3 раза с перерывом в 20–40 с между попытками. Анализировали количество ошибок среди всех сжатий динамометра. Сжатие считалось ошибочным, если оно было меньше или равно предыдущему сжатию. Для анализа использовали данные, полученные в серии с наименьшим процентом ошибок. При равном количестве ошибок в двух или более сериях отдавали предпочтение данным из более ранней попытки. Также проанализировали минимальное усилие сжатия (минимальный порог) и среднюю разницу между двумя соседними сжатиями (дифференциальный порог) (рис. 2, Г).

Статистический анализ. Все данные были записаны в кг. Для анализа данных использовали “*GraphPad Prism*” версии 8 (*GraphPad*, США). Были проверены все данные на нормальность, используя тест Шапиро-Уилка. Данные МПС анализировали с использованием *ordinary one-way ANOVA*; данные о силе удержания — *two-way RM ANOVA* (сессия × визуальная обратная связь); данные о силе воспроизведения — *two-way RM ANOVA* (сессия × визуальная обратная связь с доминирующей рукой; сессия × используемая рука с закрытыми глазами; сессия × используемая рука с открытыми глазами); данные о градации силы (количество правильных градаций, минимальный порог и дифференциальный порог) — *ordinary one-way ANOVA*; данные о градации силы (количество ошибок) — тест Крускала-Уоллиса с поправкой Данна. Уровень значимости был стандартным — $p \leq 0.05$. Были представлены все данные в виде среднего значения $\pm SEM$. Когда средние значения совокупности неизвестны, *SEM* помогает сделать надежный вывод о том, насколько оценочное значение отличается от среднего значения совокупности. *SEM* показывает, как значение *SD*, так и размер выборки, и подходит для нашей ситуации лучше, чем *SD* [43].

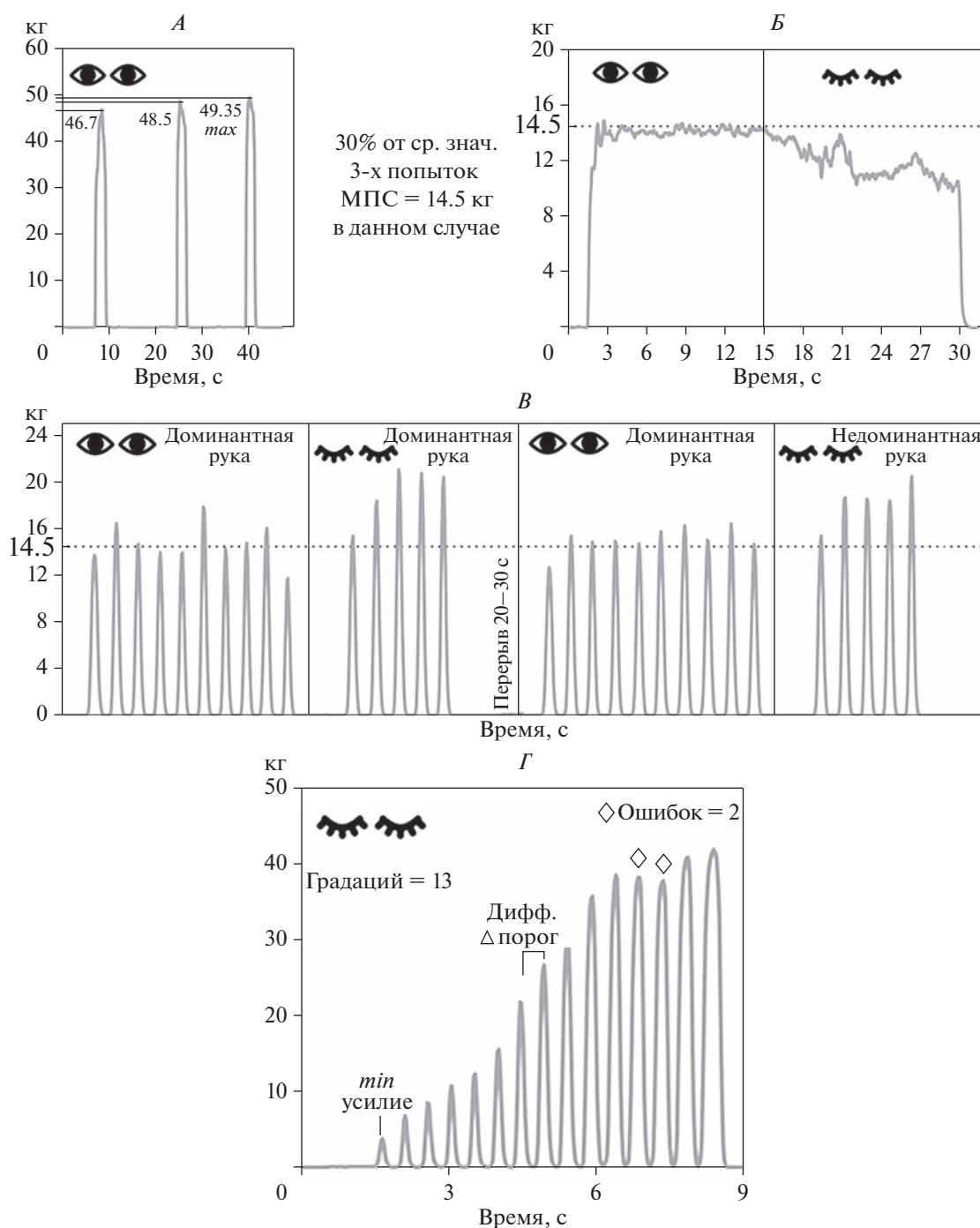


Рис. 2. Примеры исходных данных, полученных в различных тестах.

А – данные теста на максимальную произвольную силу. *Б* – данные теста на удержание целевого усилия. *В* – данные теста на воспроизведение целевого усилия. *Г* – данные теста на градацию силы сжатия. Открытые и закрытые глаза во время теста обозначены соответствующими знаками.

Для повышения надежности выводов были добавлены, проанализированы и визуализированы контрольные результаты, помогающие отследить возможные эффекты сенсомоторного обучения при выполнении этой серии тестов. В общей сложности для получения контрольных результа-

тов были использованы данные 48 добровольцев (6 женщин и 42 мужчин), собранные командой проекта. Тесты на удержание и воспроизведение эталонной силы были проведены 5 раз 12 добровольцами – 6 женщинами (30.2 ± 5.5 лет; 1.66 ± 0.1 м; 62.1 ± 8.4 кг) и 6 мужчинами (35.5 ± 4.2 года;

1.72 ± 0.1 м; 74.0 ± 8.7 кг); кроме того, еще 12 мужчин проводили эти тесты 2 раза (29.8 ± 6.6 лет; 1.77 ± 0.04 м; 70.2 ± 9.1 кг). Тесты на максимальную произвольную силу и градуацию силы хвата были выполнены 9 раз 24 добровольцами — 6 женщинами (30.2 ± 5.5 лет; 1.66 ± 0.1 м; 62.1 ± 8.4 кг) и 18 мужчинами (32.7 ± 5.4 года; 1.75 ± 0.1 м; 72.1 ± 8.9 кг); кроме того, 24 других добровольца мужского пола выполняли эти тесты 6 раз (28.5 ± 3.7 года; 1.73 ± 0.05 м; 72.2 ± 7.6 кг). Для наглядности в аннотации к каждому рисунку отражена информация о количестве участников в результатах контроля. Экспериментальные и контрольные данные анализировали отдельно, поскольку количество испытуемых в экспериментальной группе было меньше, что связано с трудностями и особенностями проведения длительного иммерсионного эксперимента [44].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Тест на максимальную произвольную силу. Результаты исследования не выявили значимого влияния СИ на динамику значений МПС (рис. 3).

Тест на удержание целевого усилия. С открытыми глазами все испытуемые во всех экспериментальных сессиях успешно справлялись с задачей удержания целевого уровня. Закрытие глаз, как правило, приводило к уменьшению фактической силы удержания. Так, контрольные результаты демонстрируют значительную разницу между усилиями удержания с закрытыми и открытыми глазами в ходе пяти тестирований (рис. 4, Б). В то же время в экспериментальной группе среднее усилие удержания динамометра с закрытыми глазами становилось все ближе и ближе к целевому усилию в ходе воздействия СИ. Таким образом, этот параметр с закрытыми глазами был значительно ниже, чем с открытыми только в течение первых четырех сеансов. Эта разница отсутствовала с 5-х сут СИ до конца эксперимента (рис. 4, А и В). Только на 1-е и 3-и сут после СИ наблюдалось достоверное увеличение значений силы удержания динамометра с закрытыми глазами относительно исходного уровня — на 1.33 ± 0.28 кг ($p = 0.0111$) и на 1.31 ± 0.32 кг ($p = 0.0134$) соответственно ($F(8, 72) = 2.122$).

Тест на воспроизведение исходной силы по памяти. В отличие от данных предыдущего теста, после закрытия глаз воспроизводящие усилия доминирующей и недоминирующей руками были значительно выше целевого уровня и результатов с открытыми глазами (рис. 4 и 5). Однако в первый день воздействия СИ эти различия не наблюдались (рис. 5, А и В). Интересно, что при выполнении теста доминирующей рукой и с закрытыми глазами разница между фактическими и целевыми усилиями вернулась к исходной уже на 3-и сут СИ (рис. 5, А).

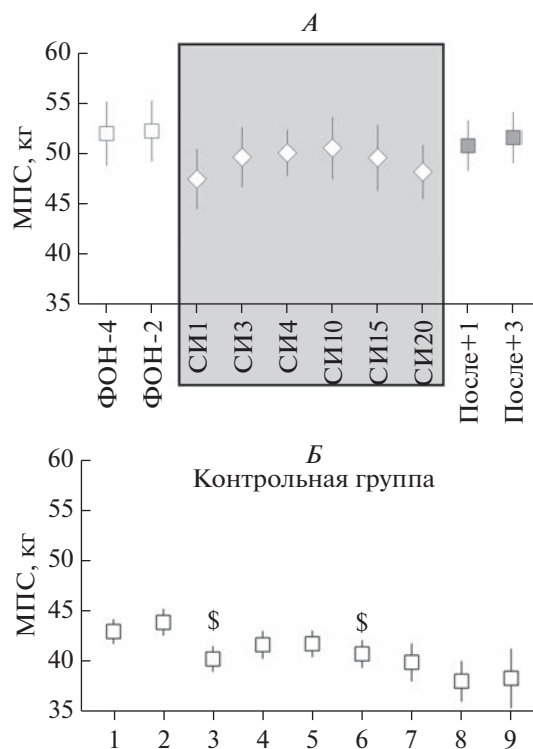


Рис. 3. Динамика изменения средних значений максимальной произвольной силы (МПС; максимальный результат 3 сжатий).

А — результаты, полученные за 2 и 4 дня до начала “сухой” иммерсии (СИ) (ФОН-2/4), на 1–20-е сут СИ (СИ1–20) и на 1 и 3 дни восстановительного периода (После +1/3); $n = 10$. Б — контрольные результаты данного параметра в ходе повторного опыта выполнения этого теста ($n = 48$ для 1–6 опыта; $n = 24$ для 7–9 опыта). \$ — $p < 0.05$ по сравнению с данными 2-го опыта выполнения теста.

При выполнении теста недоминирующей рукой и с закрытыми глазами разница между фактическими и целевыми усилиями наблюдалась только до воздействия СИ — в первые два сеанса (рис. 5, Б). Начиная с первых суток СИ, испытуемые воспроизводили целевое усилие недоминирующей рукой успешнее. Достоверная разница между результатами с закрытыми глазами, полученными с доминирующей и недоминирующей руками, была зафиксирована на 5-е сут СИ (4.20 ± 1.31 кг; $p = 0.0190$) и на 3-и сут после СИ (4.16 ± 1.31 кг; $p = 0.0211$).

В то же время контрольные результаты не демонстрируют выраженного эффекта сенсомоторного обучения в этом тесте (рис. 5, В).

Начиная с 3-х сут СИ, мы наблюдали значительную разницу между фактическими и целевыми усилиями доминирующей рукой с открытыми глазами. Эта разница постепенно увеличивалась с 5-х сут воздействия (с 0.68 ± 0.20 кг; $p = 0.0209$) до

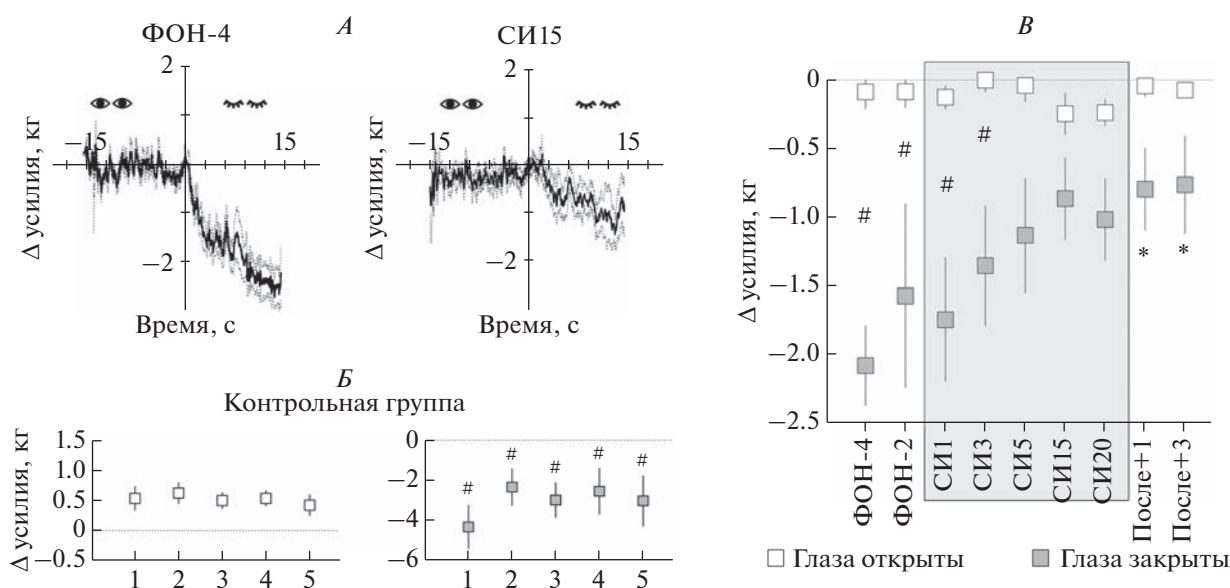


Рис. 4. Динамика изменения средних значений силы захвата при удержании целевого усилия.

А – кривые средней силы захвата, выраженные как отклонение от целевого усилия, за 4 дня до начала “сухой” иммерсии (СИ) (ФОН-4), на 15-й день СИ (СИ15). По оси абсцисс – время в секундах (с); по оси ординат – разница между фактическим и целевым усилиями захвата при открытых (слева от оси ординат) и закрытых (справа от оси ординат) глазах. $x = 0$ соответствует целевому усилию. *Б* – контрольные результаты, выраженные как отклонение фактической силы удержания от целевого уровня при открытых (белые квадраты) и закрытых (серые квадраты) глазах во время повторного опыта выполнения этого теста ($n = 24$ для 1–2 опыта; $n = 12$ для 3–5 опыта). *В* – аналогичные данные отклонения силы удержания с открытыми (белые квадраты) и закрытыми (серые квадраты) глазами в экспериментальной группе; $n = 10$. ФОН-2/4 – исходные значения, полученные за 2/4 дня до погружения в иммерсионную ванну; СИ1–20 – 1–20-е сут иммерсионного воздействия; После +1/3 – 1/3 день восстановительного периода. Пунктирная линия соответствует целевому уровню. # – $p < 0.05$ по сравнению с открытыми глазами, * – $p < 0.05$ по сравнению с ФОН-4.

3-го дня восстановления (до 0.80 ± 0.15 кг; $p = 0.0004$; рис. 5, *А* и *Б*).

Тест на градацию усилия. Контрольные результаты этого теста демонстрируют, что испытуемые обучались с каждым последующим опытом – количество градаций постепенно увеличивалось при уменьшении ошибочных градаций (рис. 6, *В*).

В экспериментальной группе количество градаций также увеличилось в течение первых четырех сеансов с 18.22 ± 1.13 до 23.7 ± 2.12 . После 5-го дня СИ это число имело тенденцию к уменьшению, однако оно не было ниже результатов первого опыта (рис. 6, *А*). В то же время, если процент ошибок составлял $9.31 \pm 2.56\%$ на первом сеансе и $7.83 \pm 2.93\%$ – на втором сеансе, то в первый день СИ этот показатель увеличивался до $11.69 \pm 3.53\%$, не достигая, однако, уровня достоверности.

Принимая во внимание результаты контрольной группы, мы связываем снижение минимального порога с 3-х сут СИ (с 1.2 до 0.58 кг) с эффектом сенсомоторного обучения (рис. 7, *А*). Аналогично, динамика значений дифференциального порога в первые 3 сеанса может быть обусловлена сенсомоторным обучением (рис. 7, *В*). Несмотря на это, снижение значений дифференциального

порога на 15-е и 20-е сут СИ, вероятно, отражает влияние факторов СИ – на 0.73 ± 0.19 и 0.86 ± 0.18 кг ниже результатов ФОН-4, соответственно ($F(7.468, 1157) = 3.196$; $p < 0.01$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты позволяют подтвердить гипотезу о том, что факторы СИ – снижение интенсивности опорных и проприоцептивных сенсорных сигналов – влияют на контроль силы хвата. Таким образом, улучшение результатов теста на удержание целевого усилия доминирующей рукой (рис. 4, *В*) и его воспроизведения недоминирующей рукой (рис. 5, *Б*), а также более низкий дифференциальный порог в СИ (рис. 7, *Б*) свидетельствуют в пользу увеличения проприоцептивной чувствительности при закрытых глазах во время воздействия СИ.

Это явление не наблюдалось при выполнении задачи со зрительной обратной связью. Результаты воспроизведения целевого усилия по памяти доминирующей рукой с открытыми глазами (рис. 5, *А*) показывают, что выполнение таких заданий может сопровождаться большим количе-

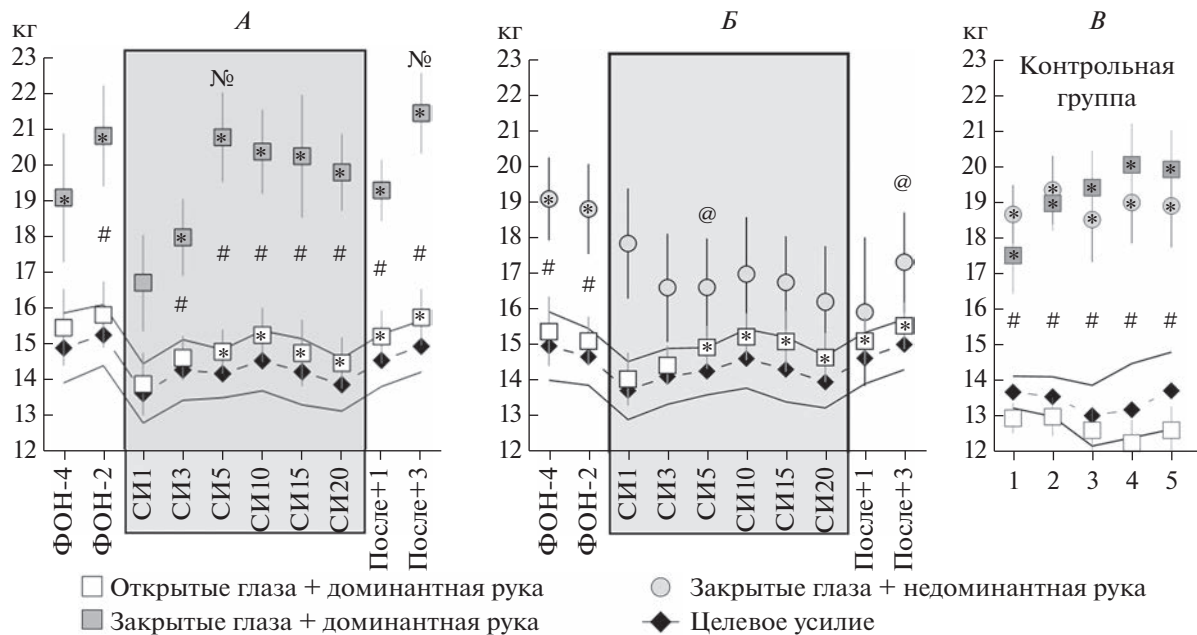


Рис. 5. Динамика изменений средних значений силы захвата при попытке воспроизведения целевого усилия (черные ромбы).

А — результаты, полученные доминирующей рукой с открытыми (белые квадраты) и закрытыми (серые квадраты) глазами в экспериментальной группе ($n = 10$). *Б* — результаты, полученные с открытыми глазами доминирующей рукой (белые квадраты) и с закрытыми глазами недоминирующей рукой (серые круги) в экспериментальной группе ($n = 10$). *В* — контрольные результаты этих параметров при пяти повторных опытах выполнения этого теста ($n = 24$ для 1–2 опыта; $n = 12$ для 3–5 опыта). ФОН-2/4 (см. рис. 4). Линиями, окружающими черные ромбы, обозначены *SEM* для целевых значений силы. * — $p < 0.05$ по сравнению с целевым уровнем, # — $p < 0.05$ по сравнению с открытыми глазами доминирующей рукой, @ — $p < 0.05$ по сравнению с закрытыми глазами доминирующей рукой, № — $p < 0.05$ по сравнению с закрытыми глазами недоминирующей рукой.

ством ошибок при отсутствии/снижении опорного афферентного притока более 5-и сут.

Результаты также показывают, что в контроле воспроизведения целевой силы хвата опорные и проприоцептивные афферентные сигналы играют менее значимую роль, в частности, по сравнению с наличием зрительной обратной связи. Однако острый период адаптации — первые два-три дня воздействия СИ — является исключением из этого предположения (рис. 5, *А*). Более точное воспроизведение целевого усилия, а также большее количество градаций и ошибок в них, при использовании доминирующей руки с закрытыми глазами в первые 3 дня воздействия СИ также может указывать на особенности острых адаптивных реакций на факторы СИ (рис. 4, *А* и рис. 6, *А*).

Наблюдаемые изменения могут быть обусловлены изменением процессов сенсорной обработки (*SPD*) [45, 46] или изменением сенсорной модуляции (*SMD*) [47] в ходе СИ. Так, многие исследования указывают на изменение модуляции сенсорных сигналов в данных условиях. Несмотря на отсутствие прямого воздействия СИ на вестибулярный аппарат, происходит повышение чувствительности к вестибулярным сигналам [48, 49], а также повышение контрастной чувствительности зрительной системы в диапазо-

не низких пространственных частот при специфической чувствительности магноцеллюлярного пути к этим частотам [50, 51]. Также были зарегистрированы изменения в функции слухового аппарата [52] и изменения в корковой организации произвольных движений [53].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаруженные изменения не указывают на значительное снижение операторских возможностей в области управления усилием хвата при 21-суточном воздействии “сухой” иммерсии. Пространственная дезориентация и вестибулярные расстройства, а не снижение опорной и проприоцептивной афферентации, вероятно, играют ключевую роль в значительном ухудшении деятельности оператора в реальном космическом полете.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлений, и одобрены Комиссией по биомедицинской этике ГНЦ РФ — ИМБП РАН (Москва). (Протокол № 483 от 03 августа 2018 г.).

Информированное согласие. Каждый участник исследования представил добровольное письмен-

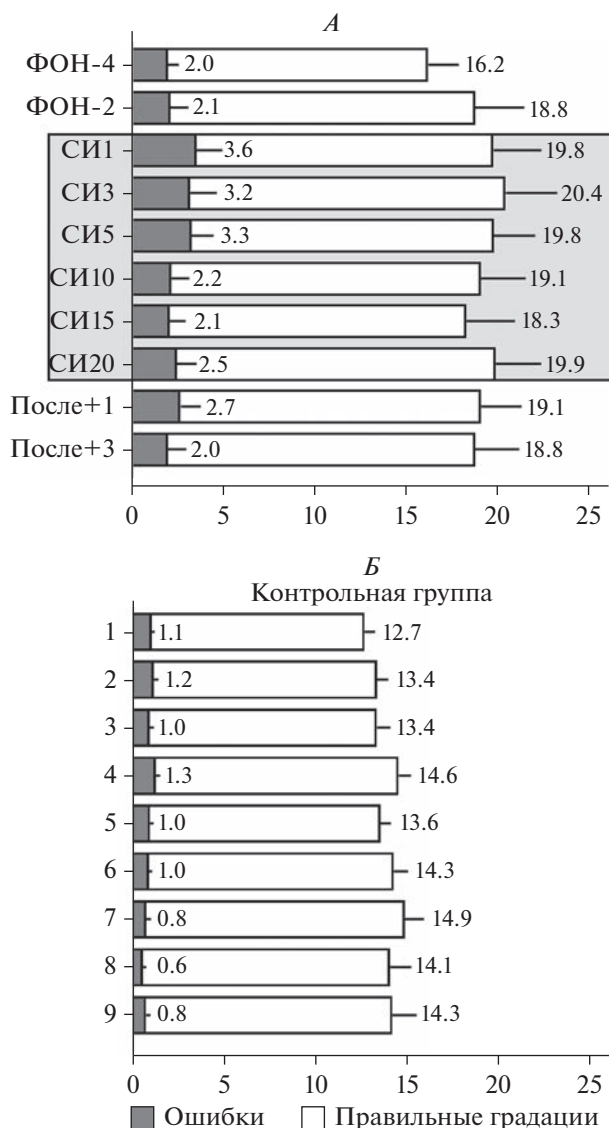


Рис. 6. Динамика количества правильных (белый цвет) и ошибочных (серый цвет) сжатий в тесте на градацию силы. *А* – результаты, полученные в экспериментальной группе; $n = 10$. *Б* – контрольные результаты этих параметров во время повторных опытов выполнения этого теста ($n = 48$ для 1–6 опыта; $n = 24$ для 7–9 опыта). ФОН-2/4 (см. рис. 4).

ное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Финансирование работы. Исследование выполнено за счет РНФ (грант № 19-15-00435), <https://rscf.ru/project/19-15-00435/>.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Вклад авторов в публикацию. И.С. Зеленская, К.А. Зеленский и Е.С. Томиловская разработали дизайн исследования. И.С. Зеленская провела исследование. И.С. Зеленская, А.А. Савеко и

Л.Е. Амирова проанализировали результаты экспериментальной группы. А.А. Савеко проанализировала контрольные результаты; была произведена глобальная переработка рукописи. И.С. Зеленская и Л.Е. Амирова написали черновик рукописи. В.В. Китов, И.Н. Носикова и К.А. Зеленский внесли вклад в раздел “Методика”. Е.С. Томиловская была руководителем 21-суточного иммерсионного эксперимента и оказывала консультативную поддержку на каждом этапе подготовки настоящей работы. Все авторы прочитали и одобрили окончательную представленную рукопись.

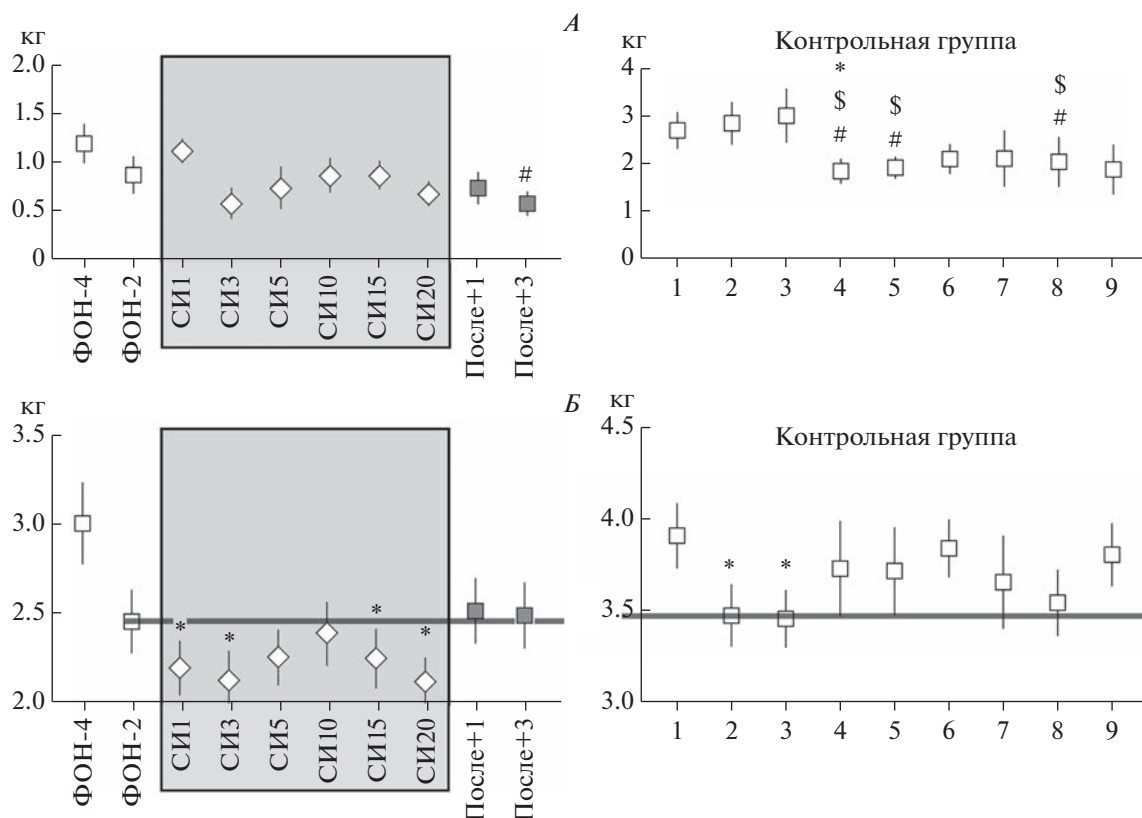


Рис. 7. Динамика значений порогов при выполнении теста на градиацию силы сжатия.

А – минимального порога сжатия. *Б* – дифференциального порога сжатия. Слева – результаты экспериментальной группы ($n = 10$), справа – контрольные результаты ($n = 48$ для 1–6 опыта выполнения; $n = 24$ для 7–9 опыта). ФОН-2/4 (см. рис. 4). * – $p < 0.05$ по сравнению с данными ФОН-4 или 1-го опыта, \$ – $p < 0.05$ по сравнению с данными 2-го опыта, # – $p < 0.05$ по сравнению с данными 3-го опыта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Johansson R.S., Westling G. Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects // *Exp. Brain Res.* 1984. V. 56. № 3. P. 550.
2. Flanagan J.R., Tresilian J.R. Grip-Load Force Coupling: A General Control Strategy for Transporting Objects // *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 1994. V. 20. № 5. P. 944.
3. Grover F., Lamb M., Bonnette S. et al. Intermittent coupling between grip force and load force during oscillations of a hand-held object // *Exp. Brain Res.* 2018. V. 236. № 10. P. 2531.
4. Закирова А.З., Шигуева Т.А., Томиловская Е.С., Козловская И.Б. Влияние механостимуляции опорных зон стоп на характеристики Н-рефлекса в условиях безопорности // *Физиология человека.* 2015. Т. 45. № 2. С. 46.
Zakirova A.Z., Shigueva T.A., Tomilovskaya E.S., Kozlovskaya I.B. Effects of mechanical stimulation of the sole support zones on the H-reflex characteristics under conditions of support unloading // *Human Physiology.* 2015. V. 41. № 2. P. 150.
5. Kozlovskaya I.B. Gravity and the Tonic Postural Motor System // *Human Physiology.* 2018. V. 44. № 7. P. 725.
6. Носикова И.Н., Рыбова А.М., Дмитриева Л.Е. и др. Особенности вызванных магнитной стимуляцией моторных потенциалов мышц голени в условиях 5-суточной “сухой” иммерсии у здоровых добровольцев // *Физиология человека.* 2021. Т. 47. № 3. С. 44.
Nosikova I.N., Ryabova A.M., Dmitrieva L.E. et al. Specific features of the motor potentials of the leg muscles induced by magnetic stimulation under the conditions of a five-day “dry” immersion in healthy volunteers // *Human Physiology.* 2021. V. 47. № 3. P. 282.
7. Attias J., Grassi A., Bosutti A. et al. Head-down tilt bed rest with or without artificial gravity is not associated with motor unit remodeling // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2020. V. 120. № 11. P. 2407.
8. Kozlovskaya I.B., Kirenskaya A.V. Mechanisms of disorders of the characteristics of fine movements in long-term hypokinesia // *Neurosci. Behav. Physiol.* 2004. V. 34. № 7. P. 747.
9. Shenkman B.S., Tsaturyan A.K., Vikhlyantsev I.M. et al. Molecular Mechanisms of Muscle Tone Impairment under Conditions of Real and Simulated Space Flight // *Acta Naturae.* 2021. V. 13. № 2. P. 85.
10. Schoenrock B., Zander V., Dern S. et al. Bed rest, exercise countermeasure and reconditioning effects on the human resting muscle tone system // *Front. Physiol.* 2018. V. 9. P. 810.
11. Demangel R., Treffel L., Py G. et al. Early structural and functional signature of 3-day human skeletal muscle

- disuse using the dry immersion model // *Physiol. J.* 2017. V. 595. № 13. P. 4301.
12. Juhl O.J., Buettmann E.G., Friedman M.A. et al. Update on the effects of microgravity on the musculoskeletal system // *NPJ Microgravity.* 2021. V. 7. № 1. P. 28.
 13. Vil'chinskaya N.A., Mirzoev T.M., Lomonosova Y.N. et al. Effect of Short-term Dry Immersion on Proteolytic Signaling in the Human Soleus Muscle // *Human Physiology.* 2017. V. 43. № 7. P. 787.
 14. Shigueva T.A., Kitov V.V., Amirova L.E. et al. Effects of microgravity on characteristics of the accuracy control of movements / 39th ISGP Meeting & ESA Life Sciences Meeting. 18-22 Jun 2018 ESA / ESTEC, Keplerlaan 1, Noordwijk, Netherlands // *Front. Physiol.* <https://doi.org/10.3389/conf.fphys.2018.26.00051>
 15. Iwase S., Nishimura N., Tanaka K., Mano T. Effects of microgravity on human physiology / *Beyond LEO-Human Health Issues for Deep Space Exploration* // Ed. Robert J. Reynolds. [Электронный ресурс]. IntechOpen, 2020. ISBN 978-1-78985-510-4. 110 p. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90700>
 16. Sayenko D.G., Miller T.F., Melnik K.A. et al. Acute effects of dry immersion on kinematic characteristics of postural corrective responses // *Acta Astronaut.* 2016. V. 121. P. 110.
 17. Bareille M.P., Maillet A. Human: Bed Rest/Head-Down-Tilt/Hypokinesia / *Generation and Applications of Extra-Terrestrial Environments on Earth.* River Publishers, 2022. P. 133.
 18. Mulavara A.P., Peters B.T., Miller C.A. et al. Physiological and Functional Alterations after Spaceflight and Bed Rest // *Med. Sci. Sports Exerc.* 2018. V. 50. № 9. P. 1961.
 19. Шишкин Н.В., Ермаков И.Ю., Амирова Л.Е. и др. Вертикальная устойчивость с открытыми и закрытыми глазами до и после воздействия 21-суточной "сухой" иммерсии // *Авиакосм. и эколог. мед.* 2020. Т. 54. № 4. С. 52.
Shishkin N.V., Ermakov I.Yu., Amirova L.E. et al. [Vertical stability with open and closed eyes before and after 21-day dry immersion] // *Aviakosm. Ekolog. Med.* 2020. V. 54. № 4. P. 52.
 20. Nguyen N., Kim G., Kim K.S. Effects of microgravity on human physiology // *Korean J. Aerosp. Environ Med.* 2020. V. 30. № 1. P. 25.
 21. Hagio S., Ishihara A., Terada M. et al. Muscle synergies of multidirectional postural control in astronauts on Earth after a long-term stay in space // *J. Neurophysiol.* 2022. V. 127. № 5. P. 1230.
 22. Ohira T., Kawano F., Goto K. et al. Responses of neuromuscular properties to unloading and potential countermeasures during space exploration missions // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2022. V. 136. P. 104617.
 23. Erdeniz B., Tükel Ş. The effects of weightlessness on human body: spatial orientation, sensory-integration and sensory-compensation / *Comparative Kinesiology of the Human Body.* Academic Press, 2020. P. 477.
 24. Bloomberg J.J., Reschke M.F., Clement G. et al. Evidence Report: Risk of Impaired Control of Spacecraft/Associated Systems and Decreased Mobility Due to Vestibular / National Aeronautics and Space Administration Lyndon B. Johnson Space Center Houston, Texas, 2015. 152 p. [Электронный ресурс]. Report/Patent Number JSC-CN-34446. NTRS 20150018603.
 25. Gantchev G., Gatev P., Stambolieva K. et al. Weightlessness influences the handgrip force matching // *Bylgarska Akademiya na Naukite, Dokladi.* 1994. V. 47. № 10. P. 115.
 26. Gaveau J., Paizis C., Berret B. et al. Sensorimotor adaptation of point-to-point arm movements after spaceflight: the role of internal representation of gravity force in trajectory planning // *J. Neurophysiol.* 2011. V. 106. № 2. P. 620.
 27. Moore S.T., Dilda V., Morris T.R. et al. Long-duration spaceflight adversely affects post-landing operator proficiency // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. № 1. P. 2677.
 28. Tays G.D., Hupfeld K.E., McGregor H.R. et al. The Effects of Long Duration Spaceflight on Sensorimotor Control and Cognition // *Front. Neural. Circuits.* 2021. V. 15. P. 723504.
 29. Гуровский Н.Н., Черпахин М.А. К вопросу о сенсорно-моторной координации человека в условиях невесомости // *Косм. биол. и мед.* 1967. Т. 1. № 3. С. 52.
Gurovsky N.N., Cherpakhin M.A. [On the sensomotor coordination of man during weightlessness] // *Kosm. Biol. Med.* 1967. V. 1. № 3. P. 52.
 30. Bock O., Cheung B.S.K. Control of isometric force in hypergravity // *Aviat. Space Environ. Med.* 1998. V. 69. № 1. P. 27.
 31. Mierau A., Girgenrath M., Bock O. Isometric force production during changed-Gz episodes of parabolic flight // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2008. V. 102. № 3. P. 313.
 32. Dalecki M., Dräger T., Mierau A., Bock O. Production of finely graded forces in humans: Effects of simulated weightlessness by water immersion // *Exp. Brain Res.* 2012. V. 218. № 1. P. 41.
 33. Koppelmans V., Mulavara A.P., Yuan P. et al. Exercise as potential countermeasure for the effects of 70 days of bed rest on cognitive and sensorimotor performance // *Front. Syst. Neurosci.* 2015. V. 9. P. 121.
 34. Opsomer L., Théate V., Lefèvre Ph., Thonnard J.-L. Dexterous manipulation during rhythmic arm movements in Mars, moon, and micro-gravity // *Front. Physiol.* 2018. V. 9. P. 938.
 35. Bruno V., Sarasso P., Fossataro C. et al. The rubber hand illusion in microgravity and water immersion // *NPJ Microgravity.* 2022. V. 8. № 1. P. 15.
 36. Tays G.D., McGregor H.R., Lee J.K. et al. The Effects of 30 Minutes of Artificial Gravity on Cognitive and Sensorimotor Performance in a Spaceflight Analog Environment // *Front. Neural. Circuits.* 2022. V. 16. P. 784280.
 37. Ekstrand E., Rylander L., Lexell J., Brogårdh C. Perceived ability to perform daily hand activities after stroke and associated factors: a cross-sectional study // *BMC Neurol.* 2016. V. 16. № 1. P. 208.
 38. Шульженко Е.Б., Виль-Вильямс И.Ф. Возможность проведения длительной водной иммерсии методом "сухого" погружения // *Косм. биол. и авиакосм. мед.* 1976. Т. 10. С. 82.
Shulzhenko E.B., Vill-Villiams I.F. [The opportunity to conduct long-term water immersion method Dry Immersion] // *Kosm. Biol. Aviakosm. Med.* 1976. V. 10. P. 82.
 39. Шульженко Е.Б. Физиологические эффекты измененной гравитации (модельные эксперименты в наземных условиях). Автореф. дис. ... докт. мед. наук. М.: Ин-т мед.-биол. проблем, 1975. 27 с.
 40. Tomilovskaya E.S., Rukavishnikov I.V., Amirova L.E. et al. 21-Day dry immersion: schedule of investigations and

- major results // *Human Physiology*. 2021. V. 47. № 7. P. 735.
41. Reschke M.F., Kozlovskaya I.B., Lysova N. et al. [Joint Russian-USA field test: implications for deconditioned crew following long duration spaceflight] // *Aviakosm. Ekolog. Med.* 2020. V. 54. № 6. P. 94.
 42. Jones L.A., Hunter I.W. Effect of fatigue on force sensation // *Exp. Neurol.* 1983. V. 81. № 3. P. 640.
 43. Tang L., Zhang H., Zhang B. A note on error bars as a graphical representation of the variability of data in biomedical research: choosing between standard deviation and standard error of the mean // *J. Pancreatol.* 2019. V. 2. № 3. P. 69.
 44. Reynolds R.J., Shelhamer M. Introductory Chapter: Research Methods for the Next 60 Years of Space Exploration / Beyond LEO-Human Health Issues for Deep Space Exploration. [Электронный ресурс]. In: *techOpen*, 2020. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92331>
 45. Miller L.J., Nielsen D.M., Schoen S.A., Brett-Green B.A. Perspectives on sensory processing disorder: a call for translational research // *Front. Hum. Neurosci.* 2009. V. 3. P. 22.
 46. Miller L.J., Schoen S.A., Mulligan S., Sullivan J. Identification of sensory processing and integration symptom clusters: A preliminary study // *Occup. Ther. Int.* 2017. P. 2876080.
 47. Bar-Shalita T., Granovsky Y., Parush S., Weissman-Fogel I. Sensory modulation disorder (SMD) and pain: a new perspective // *Front. Hum. Neurosci.* 2019. V. 13. P. 27.
 48. Глухих Д.О., Наумов И.А., Корнилова Л.Н. Следящая функция глаз, зрительно-мануальное слежение и вестибулярная функция в условиях 21-суточной "сухой" иммерсии // *Авиакосм. и эколог. мед.* 2020. Т. 54. № 4. С. 44.
Glukhikh D.O., Naumov I.A., Kornilova L.N. et al. [Eye tracking function, visual-manual tracking and vestibular function under the conditions of 21-day dry immersion] // *Aviakosm. Ekolog. Med.* 2020. V. 54. № 4. P. 44.
 49. Наумов И.А., Корнилова Л.Н., Глухих Д.О. и др. Влияние афферентации различных сенсорных входов на отолито-окулярный рефлекс в условиях реальной и моделируемой невесомости // *Физиология человека*. 2021. Т. 47. № 1. С. 84.
Naumov I.A., Kornilova L.N., Glukhikh D.O. et al. The Effect of Afferentation of Various Sensory Systems on the Otolith-Ocular Reflex in a Real and Simulated Weightlessness // *Human Physiology*. 2021. V. 47. № 1. P. 70.
 50. Соснина И.С., Ляховецкий В.А., Зеленский К.А. и др. Влияние 21-суточной "сухой" иммерсии на иллюзии Понзо и Мюллер-Лайера // *Физиология человека*. 2021. Т. 47. № 1. С. 63.
Sosnina I.S., Lyakhovetskiy V.A., Zelenskiy K.A. et al. The effect of a 21-day dry immersion on Ponzo and Müller-Lyer illusions // *Human Physiology*. 2021. V. 47. № 1. P. 51.
 51. Шошина И.И., Соснина И.С., Зеленский К.А. и др. Контрастная чувствительность зрительной системы в условиях "сухой" иммерсии // *Биофизика*. 2020. Т. 65. № 4. С. 798.
Shoshina I.I., Sosnina I.S., Zelenskiy K.A. et al. The contrast sensitivity of the visual system in "dry" immersion conditions // *Biophysics*. 2020. V. 65. № 4. P. 681.
 52. Пасекова О.Б., Сигалева Е.Э., Марченко Л.Ю., Мацнев Э.И. Перспектива использования метода регистрации различных классов отоакустической эмиссии для динамической оценки состояния внутричерепного давления в условиях моделируемой микрогравитации и космического полета / 55-е Научные чтения памяти К.Э. Циолковского. Калуга, 15–17 сентября 2020 г. // *Научное значение трудов К.Э. Циолковского: история и современность*. Калуга: ИП Стрельцов И.А. (Изд-во "Эйдос"), 2020. Ч. 1. С. 314.
 53. Томиловская Е.С., Киренская А.В., Лазарев И.Е. и др. Влияние безопасности на характеристики пресаккадических ЭЭГ-потенциалов у испытуемых с разным профилем асимметрии // *Авиакосм. и эколог. мед.* 2008. Т. 42. № 5. С. 14.
Tomilovskaya E.S., Kirenskaya A.V., Lazarev I.E. [Influence of lack of safety on the characteristics of presagade EEG potentials in subjects with different asymmetry profiles] // *Aviakosm. Ekolog. Med.* 2008. V. 42. № 5. P. 14.

Grip Force Control in 21-Day Dry Immersion

I. S. Zelenskaya^a, *, A. A. Saveko^a, L. E. Amirova^a, V. V. Kitov^a, I. N. Nosikova^a,
K. A. Zelenskiy^a, E. S. Tomilovskaya^a

^a*Institute of Biomedical Problems of the RAS, Moscow, Russia*

*E-mail: radostniyden@mail.ru

During space flight, the changes in the functions of the upper limbs can affect the quality of operator activity. At the same time, there are very few data on this topic, because most of the research is focused on the structure and functions of the lower extremities. The aim was to study the characteristics of the grip force control during the decrease of the support and proprioceptive sensory signals in the conditions of the ground-based model of the effects of space flight – dry immersion (DI). The duration of DI exposure was 21 days. 10 male volunteers performed tests using a hand dynamometer for maximal voluntary contraction, the maintenance of the reference force, the reproduction of this force from memory, and the grip force gradation test. The subjects performed this series of tests before exposure to DI, then on days 1, 3, 5, 10, 15, and 20 of DI, and days 1 and 3 of the recovery period. The results show that DI exposure led to an increase in proprioceptive sensitivity in the tasks without visual feedback when with open eyes from day 5 of DI the subjects were more mistaken in the reproduction of the reference force using the dominant hand. The sensory processing/modulation disorder under DI factors may cause this phenomenon.

Keywords: motor control, dry immersion, space flight, grip force, dynamometry.