

УДК 612.76+612.014.4

ВЛИЯНИЕ “СУХОЙ” ИММЕРСИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ТОЧНОСТНЫХ ДВИЖЕНИЙ РУКИ

© 2022 г. В. А. Ляховецкий^{1, *}, И. С. Зеленская^{1, 2, **}, В. Ю. Карпинская¹, М. П. Бекренева², К. А. Зеленский², Е. С. Томиловская²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²ФГБУН ГНЦ РФ – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

*E-mail: v_la2002@mail.ru

**E-mail: radostniyden@mail.ru

Поступила в редакцию 11.05.2022 г.

После доработки 31.05.2022 г.

Принята к публикации 10.06.2022 г.

Исследованы характеристики точностных движений руки в “сухой” иммерсии (СИ). Двигательные задачи представляли собой циклические односуставные движения руки, соответствующие длине и ориентации предъявляемого горизонтального или вертикального отрезка, осуществляемые на протяжении 5 с при наличии или отсутствии зрительной обратной связи. Исследования проводили с участием 35 испытуемых, разделенных на три группы – контроля ($n = 10$), 6-часовой ($n = 11$) и 5-суточной СИ ($n = 14$). В группе контроля тест был проведен трижды, лежа на кушетке, имитируя циклограмму 6-часовой СИ – один раз до погружения, утром в день СИ и вечером через 2 ч после окончания воздействия. В 5-суточной СИ тесты проводили один раз до начала СИ, на 1-е, 3-и и 5-е сутки СИ, а также один раз по ее окончании. Показано, что точность движений в контрольной группе не зависит от номера измерения, в то время как в экспериментальных группах на первый день СИ наблюдается увеличение переоценки длины горизонтальных отрезков и увеличение ошибки оценки направления вертикальных отрезков. Данные свидетельствуют о том, что СИ влияет на систему управления движениями рук и может рассматриваться как подходящая наземная модель для исследования нарушений точностных движений, наблюдаемых в условиях микрогравитации.

Ключевые слова: движения руки, “сухая” иммерсия, гравитация.

DOI: 10.31857/S0131164622600380

В космическом полете (КП) условия работы космонавта значительно отличны от наземных вследствие состояния невесомости [1]. Невесомость нарушает деятельность, в первую очередь, вестибулярной и опорной систем [2], что приводит к реорганизации системы управления движениями за счет ее переориентации на менее гравитационно-зависимые системы, такие как зрительная. Такая переориентация сопровождается различными ориентационными иллюзиями [3] и приводит к замедлению движений или потере их точности [4, 5].

Изучение базисных механизмов межсенсорных взаимодействий и их нарушений производится комплексно, как во время КП, так и в наземных исследованиях, позволяющих использование как большего размера выборки, так и более строгой циклограммы исследований. Наряду с моделями параболического полета [6], разгрузки одной из конечностей [7], подводного погружения [8] и антиортостатической гипокинезии [9] в

гравитационной физиологии широко используется такая модель гравитационной разгрузки, как “сухая” иммерсия (СИ) [10, 11]. Большинство исследований посвящено изучению влияния СИ на позно-тоническую систему [12], вопрос о роли опорной афферентации в системе управления движениями руки остается мало изученным. СИ, в отличие от истинной микрогравитации, опосредованно влияет как на мышечный аппарат верхних конечностей, так и на систему их управления [13], поэтому представляет интерес как собственно возможность инициации нарушений движений руки, так и степень и динамика их выраженности, зависящие от длительности иммерсионного воздействия. При этом СИ может влиять в различной степени на внутреннее представление таких компонентов планирования движения, как амплитуда и направление [14]. Целью настоящей работы являлось изучение влияния опорной разгрузки на характеристики точностных движений руки на протяжении СИ различной длительности.

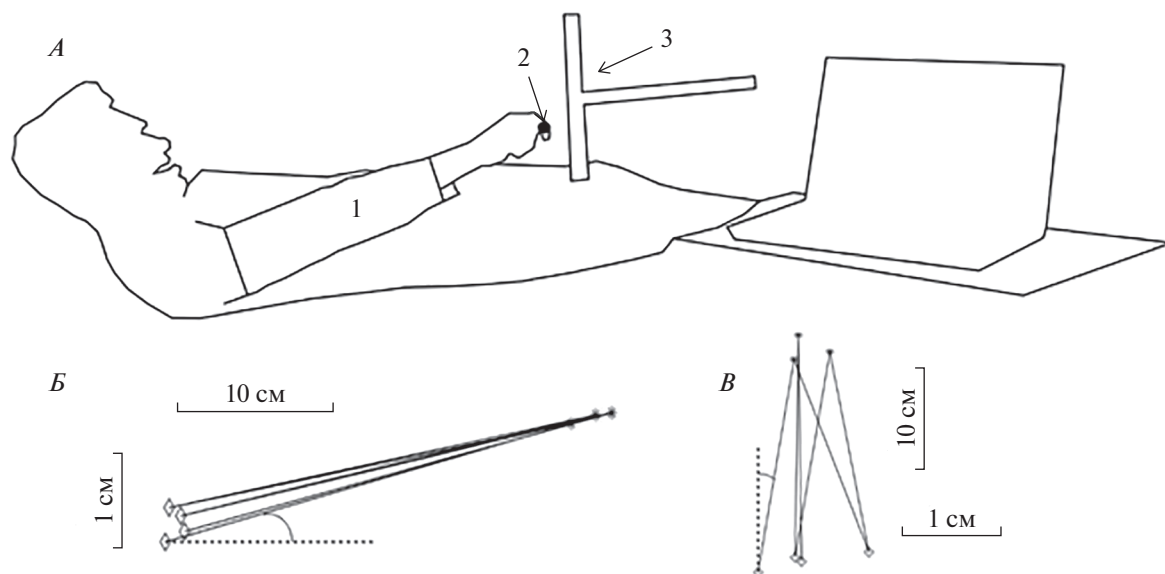


Рис. 1. Дизайн эксперимента.

A – положение испытуемого в ходе опыта. 1 – фиксатор локтя, 2 – электромагнитный датчик, 3 – тестовый отрезок. *Б, В* – пример индивидуальных движений при оценке горизонтального (*Б*) и вертикального (*В*) отрезка. Отмечены углы с горизонтальной (*Б*) и вертикальной (*В*) линией.

МЕТОДИКА

В исследовании участвовали 3 группы испытуемых-мужчин. В контрольную группу входило 10 чел., возраст 29.9 ± 5.4 лет. Две других группы испытуемых находились в условиях СИ, т.е. были погружены в специальную ванну, наполненную водой, покрытой водонепроницаемой пленкой, отделяющей испытуемого от воды [11]. В группу испытуемых, находившихся в 6-часовой иммерсии (СИ-6ч), входило 11 чел., возраст 24.5 ± 3.4 лет, в группу испытуемых, находившихся в 5-дневной иммерсии (СИ-5), входило 14 чел., возраст 31.2 ± 7.4 лет. Все исследования были неинвазивными и при проведении тестов дискомфорта не вызывали. Оборудование соответствовало нормам безопасности.

Для контрольной группы измерения проводили трижды: в первый день один раз (Фон1), во второй день два раза – утром (Фон2) и вечером (Фон3). Подобная схема измерений соответствовала циклограмме группы СИ-6ч: измерения проводили до иммерсии (Фон), во время 6-часовой иммерсии (СИ-6ч) после 4-х часового иммерсионного воздействия и через 2 ч после окончания СИ ($R + 0$). В группе СИ-5 измерения проводили до начала СИ (Фон), на 1-й (СИ1), 3-й (СИ3) и 5-й день (СИ5) СИ и после ее окончания ($R + 0$). В контрольной группе, а также до и после СИ тесты проводили на кушетке при стандартном положении тела, полулежа. При выполнении теста в СИ выемка испытуемого не требовалась.

Ведущую руку испытуемых определяли по результатам Эдинбургского опросника [15]. Все испытуемые выполняли задание ведущей рукой. Задачей испытуемого было осуществление циклических односуставных движений руки, соответствующих длине и ориентации предъявляемого отрезка, на протяжении 5 с (рис. 1, *A*). Аналогично [4, 16], рука, выполняющая движение, во время теста была всегда зафиксирована в положении, исключающем движения в локтевом суставе. В каждом опыте последовательно проводили четыре измерения:

1. отрезок ориентирован горизонтально, глаза испытуемого открыты;
2. отрезок ориентирован горизонтально, глаза испытуемого закрыты;
3. отрезок ориентирован вертикально, глаза испытуемого открыты;
4. отрезок ориентирован вертикально, глаза испытуемого закрыты.

Длина отрезка во всех измерениях составляла 20 см.

Для регистрации трехмерной траектории движения (рис. 1, *Б, В*) использовали датчик электромагнитной системы *3D Guidance trakSTAR* (Ascension Technology Corporation, США) с частотой дискретизации 80 Гц и погрешностью измерения 1.4 мм, который испытуемый удерживал между указательным и большим пальцем. Полученную траекторию в автоматизированном режиме обработки с помощью оригинального программного обеспечения в среде технических вычислений *Matlab R2016b* (Matworks Inc., США) экстраполи-

ровали отдельными отрезками (их концы помечены ромбиками и звездочками на рис. 1, Б, В). Определяли длину каждого отрезка в евклидовом трехмерном пространстве, время, которое требовалось испытанному на это движение, а также угол между данным отрезком и горизонтальной (рис. 1, Б) или вертикальной (рис. 1, В) осью. Далее по всем отрезкам определяли среднюю длину отрезка траектории в данном опыте, среднюю скорость движения, как отношение средней длины этого отрезка к среднему времени движения руки, и средний угол отклонения от соответствующей оси.

Полученные наборы значений для каждой группы в рамках условий (горизонтальный или вертикальный отрезок, открытые или закрытые глаза) и дней измерений сравнивали между собой с помощью *t*-критерия Стьюдента (если оба набора значений были распределены нормально по критерию Лиллиефорса) или с помощью знакового рангового критерия Уилкоксона (в противном случае). Достоверность отличий между соответственными измерениями, проведенными в различные дни, или между измерениями, проведенными в один день, но в разных условиях, отличающихся значением одного параметра (например, условие “горизонтальный отрезок, открытые глаза” против условия “горизонтальный отрезок, закрытые глаза”) оценивали на уровне $p < 0.05$ с учетом поправки Бонферрони на число множественных сравнений. Данные представлены в виде Среднее \pm Стандартное отклонение.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Испытантели *контрольной* группы (рис. 2) в равной степени, не зависящей от условия и порядкового номера опыта, переоценивали предъявляемые отрезки; скорость их движений также не зависела от условия и порядкового номера опыта. При этом оценки направления горизонтальных отрезков были более точными, чем оценки направлений вертикальных отрезков во всех (Фон1–Фон3) измерениях как при условии открытых, так и при условии закрытых глаз (открытые глаза: $4.85^\circ \pm 4.84^\circ$, $3.03^\circ \pm 2.02^\circ$, $5.37^\circ \pm 4.68^\circ$ против $21.85^\circ \pm 14.98^\circ$, $23.26^\circ \pm 17.56^\circ$, $23.81^\circ \pm 14.11^\circ$ для измерений Фон1, Фон2, Фон3 соответственно, $p < 0.01$; закрытые глаза: $5.41^\circ \pm 5.37^\circ$, $3.80^\circ \pm 3.62^\circ$, $5.49^\circ \pm 5.60^\circ$ против $24.42^\circ \pm 11.39^\circ$, $26.20^\circ \pm 16.42^\circ$, $24.85^\circ \pm 16.01^\circ$ для измерений Фон1, Фон2, Фон3 соответственно, $p < 0.01$).

Испытантели *экспериментальной* группы СИ-64 (рис. 3) также всегда переоценивали предъявляемые отрезки, причем степень переоценки зависела как от условия, так и от дня измерения. До и после СИ переоценка горизонтальных отрезков при закрытых глазах испытантеля была ниже, чем горизонтальных отрезков при открытых глазах и

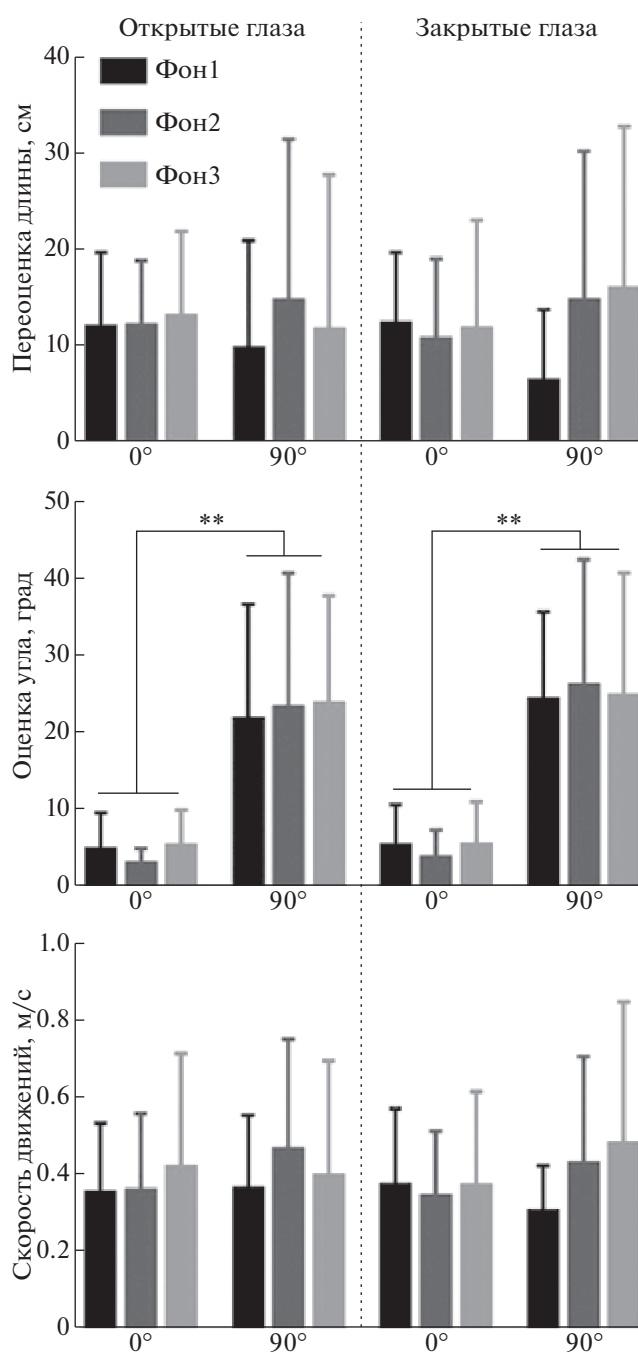


Рис. 2. Точность движений руки испытантелей контрольной группы ($n = 10$). 0° – движения вдоль горизонтальных отрезков, 90° – движения вдоль вертикальных отрезков. ** – $p < 0.01$. Среднее \pm Стандартное отклонение.

вертикальных отрезков при закрытых глазах (Фон: 3.39 ± 3.74 см против 7.12 ± 1.82 см, $p < 0.01$ и 10.46 ± 3.49 см, $p < 0.01$ соответственно; R + 0: 4.41 ± 2.97 см против 7.81 ± 3.24 см, $p < 0.01$ и 9.71 ± 3.28 см, $p < 0.001$, соответственно). При этом до и после СИ скорость движения руки по горизонтальным отрезкам при закрытых глазах

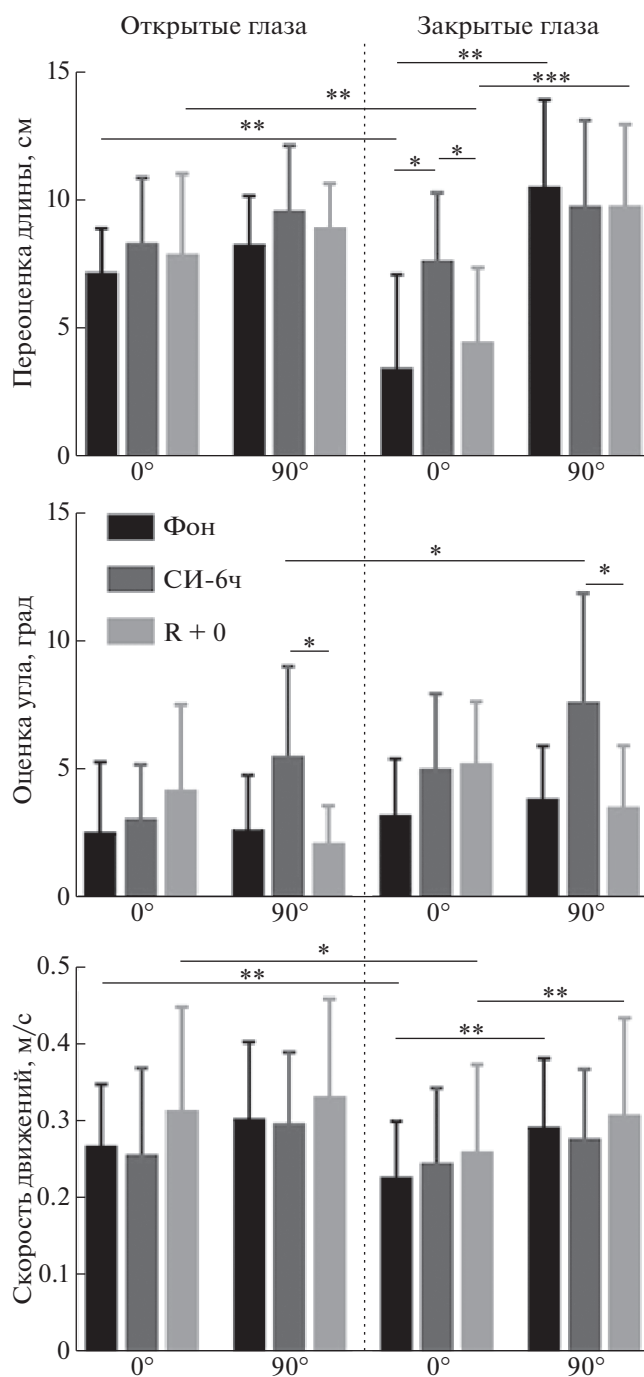


Рис. 3. Точность движений руки испытуемых, находившихся в 6-часовой “сухой” иммерсии (СИ), в фоне, в течение иммерсии и после ее окончания (R + 0) ($n = 11$).

* – $p < 0.05$, *** – $p < 0.001$. Остальные обозначения см. рис. 2.

была ниже, чем по горизонтальным отрезкам при открытых глазах и по вертикальным отрезкам при закрытых глазах (Фон: 0.23 ± 0.07 м/с против 0.27 ± 0.08 м/с, $p < 0.01$ и 0.29 ± 0.10 м/с, $p < 0.01$, соответственно; R + 0: 0.26 ± 0.12 см против $0.31 \pm$

± 0.14 м/с, $p < 0.05$ и 0.31 ± 0.13 м/с, $p < 0.01$ соответственно). Во время СИ переоценка горизонтальных отрезков при закрытых глазах увеличивалась по сравнению с условиями до и после СИ (7.57 ± 2.74 см против 3.39 ± 3.74 см, $p < 0.05$ и 4.41 ± 2.97 см, $p < 0.05$ соответственно). Также во время СИ увеличивалась ошибка оценки направления вертикальных отрезков как при открытых, так и при закрытых глазах по отношению к измерениям, проведенным после СИ ($5.47^\circ \pm 3.58^\circ$ против $2.06^\circ \pm 1.56^\circ$, $p < 0.05$ и $7.56^\circ \pm 4.34^\circ$ против $3.46^\circ \pm 2.49^\circ$, $p < 0.05$ соответственно). При этом во время СИ ошибка оценки направления вертикальных отрезков при открытых глазах была ниже, чем при закрытых ($5.47^\circ \pm 3.58^\circ$ против $7.56^\circ \pm 4.34^\circ$, $p < 0.05$).

Испытуемые экспериментальной группы СИ-5 (рис. 4, табл. 1) также переоценивали предъявляемые отрезки. Подобно испытуемым предыдущей группы, степень переоценки горизонтальных отрезков при закрытых глазах до СИ была ниже, чем при открытых глазах (5.75 ± 3.03 см против 8.26 ± 2.51 см, $p < 0.01$), а по окончании СИ была ниже, чем степень переоценки вертикальных отрезков при закрытых глазах (6.50 ± 3.83 см против 9.40 ± 5.87 см, $p < 0.01$). При этом до и после СИ скорость движения руки вдоль горизонтальных отрезков при закрытых глазах была ниже, чем при открытых (0.34 ± 0.11 м/с против 0.41 ± 0.13 м/с, $p < 0.01$ и 0.35 ± 0.10 м/с против 0.40 ± 0.10 м/с, $p < 0.01$ соответственно). До СИ ошибка оценки направления горизонтальных отрезков при закрытых глазах была выше, чем при открытых ($3.39^\circ \pm 2.38^\circ$ против $1.51^\circ \pm 1.18^\circ$, $p < 0.01$). В первый день СИ ошибка оценки направления вертикальных отрезков при открытых глазах была выше, чем до СИ и на пятый день СИ ($5.38^\circ \pm 9.65^\circ$ против $1.23^\circ \pm 1.63^\circ$, $p < 0.001$ и $1.45^\circ \pm 0.98^\circ$, $p < 0.01$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Переоценка воспроизводимых отрезков (гиперметрия), наблюдаемая во всех трех группах, по-видимому, более характерна для используемых в работе циклических движений [17], чем для одиночных, при выполнении которых без зрительной обратной связи амплитуда движения недооценивается [18]. Можно предположить, что испытуемые полагали предложенную задачу достаточно простой и придерживались следующей стратегии: вначале они классифицировали отрезок как горизонтальный или вертикальный [19], а затем воспроизводили его, основываясь в большей степени на проприоцепции, чем на зрительной информации. Поэтому в контрольной группе степень переоценки отрезков не зависела от того, доступна ли испытуемому зрительная обратная связь. Некоторое усложнение задачи (закрытые

глаза) приводило к тому, что испыталые экспериментальных групп выполняли движения вдоль горизонтальных отрезков в фоне (группы СИ-6ч и СИ-5) и по окончании СИ (группа СИ-5) более медленно, чем при открытых глазах. Такое снижение скорости движений позволяло им более четко контролировать длину перемещения руки, что приводило вне СИ к уменьшению степени переоценки длины (но не направления) горизонтальных отрезков. Представленные результаты могут быть связаны и с повышением эффективности процессов научения при усложнении irrelevantных компонентов задачи [20]. В данном случае зрительная обратная связь (фактор открытых или закрытых глаз) косвенно связана с заучиванием движения, соответствующего длине отрезка, ориентированного вертикально или горизонтально. Более того, сама оценка длины могла рассматриваться испыталым как вторичная задача по отношению к оценке ориентации отрезка (ориентация менялась, а длина нет). Такие результаты характерны для большого количества когнитивных задач в различных модальностях, что объясняется закономерностями работы сознания.

В целом воспроизведение вертикальных отрезков приводило к большим ошибкам, чем воспроизведение горизонтальных (большая ошибка направления для всех сессий опытов контрольной группы; большая переоценка длины отрезка при закрытых глазах до и после СИ в группе СИ-6ч, а также после СИ в группе СИ-5). Этот факт может быть объяснен тем, что в отличие от горизонтальных движений, направление которых перпендикулярно вектору гравитации, направление циклических вертикальных движений либо сонаправлено, либо противоположно вектору гравитации [21].

На переоценку длины вертикального отрезка при движениях при закрытых глазах, когда действие осуществляется по памяти, с использованием зрительной информации вентрального потока [22], может влиять и общая тенденция переоценки вертикального отрезка по сравнению с горизонтальным, являющаяся одним из факторов возникновения зрительной вертикально-горизонтальной иллюзии [23, 24]. При нахождении в СИ различия между переоценкой горизонтальных и вертикальных отрезков исчезают, что косвенно может свидетельствовать об изменении восприятия вертикали при гравитационной разгрузке. Изменения подобной направленности наблюдались и в других экспериментальных парадигмах: микрогравитация во время параболического полета в наибольшей степени снижает силу вертикально-горизонтальной иллюзии [25], кубы сплющиваются при рисовании с закрытыми глазами в условиях КП [26], острый когнитивный

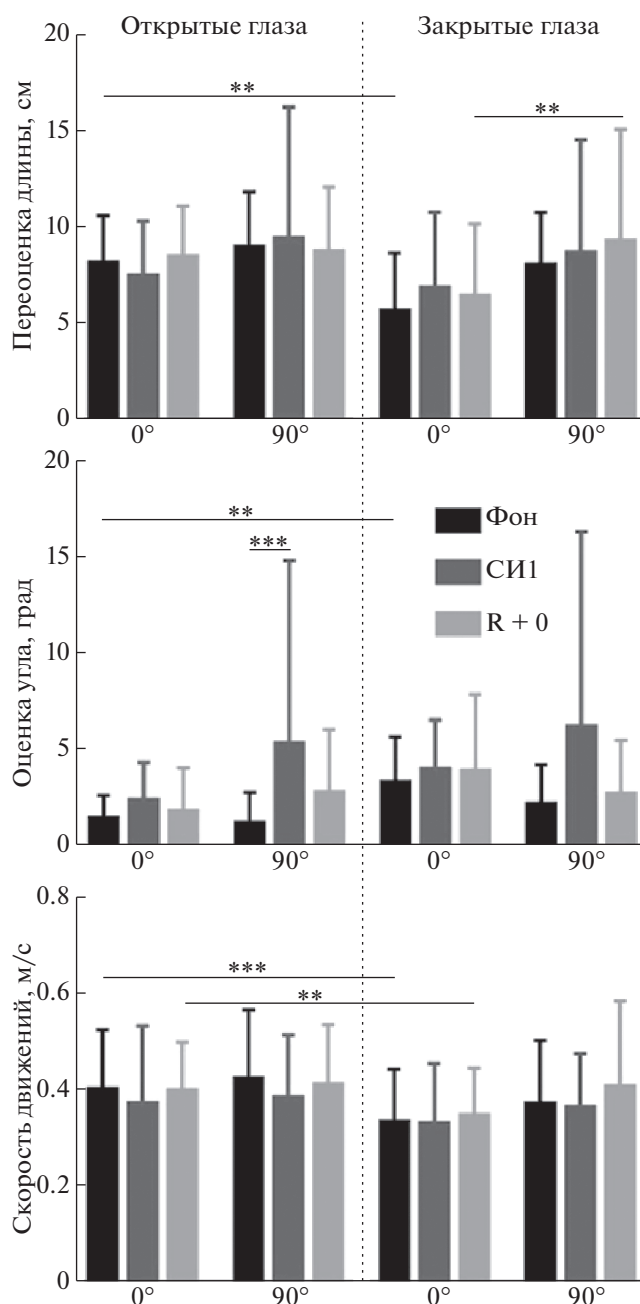


Рис. 4. Точность движений руки испыталых, находившихся в 5-дневной “сухой” иммерсии (СИ), в фоне, на первый день иммерсии и после ее окончания (R + 0) ($n = 14$).

*** – $p < 0.001$. Остальные обозначения см. рис. 2.

стресс влияет на циклические движения рук в вертикальной, но не горизонтальной плоскости [27].

В контрольной группе рассматриваемые параметры не зависели от номера измерения, следовательно, наблюдаемые в обеих экспериментальных группах увеличения степени переоценки длины и ошибки оценки направления отрезка связаны собственно с пребыванием испыталых в усло-

Таблица 1. Точность движений руки испытуемых, находившихся в 5-дневной “сухой” иммерсии (СИ) на третий и пятый день иммерсии ($n = 14$)

| Длительность СИ | Открытые глаза | | Закрытые глаза | |
|-----------------|------------------------|-------------|----------------|----------------------|
| | 0° | 90° | 0° | 90° |
| | переоценка длины, см | | | |
| СИ3 | 7.33 ± 3.30 | 7.63 ± 2.74 | 8.29 ± 5.05 | 7.99 ± 5.12 |
| СИ5 | 6.64 ± 5.15 | 8.29 ± 2.92 | 7.61 ± 4.90 | 8.43 ± 3.55 |
| | Оценка угла, ° | | | |
| СИ3 | 2.03 ± 1.57 | 2.04 ± 1.60 | 3.36 ± 2.22 | 2.29 ± 2.47 |
| СИ5 | 4.06 ± 9.77 | 1.44 ± 0.98 | 3.14 ± 2.45 | 2.24 ± 1.28** от СИ1 |
| | Скорость движений, м/с | | | |
| СИ3 | 0.36 ± 0.12 | 0.37 ± 0.12 | 0.33 ± 0.11 | 0.38 ± 0.13 |
| СИ5 | 0.35 ± 0.15 | 0.41 ± 0.14 | 0.32 ± 0.11 | 0.37 ± 0.13 |

Примечание: 0° – движения вдоль горизонтальных отрезков, 90° – движения вдоль вертикальных отрезков. ** – $p < 0.01$. Среднее ± Стандартное отклонение.

виях СИ, а не с потенциально нелинейной динамикой обучения выполнению непривычной моторной задачи. Присутствие таких ошибок, качественно подобных наблюдаемых в условиях параболического [16] и космического [4] полета, а также при моделируемой с помощью технических устройств микрогравитации [28], свидетельствует о валидности модели СИ для исследования точностных характеристик движений руки. Предположительно, уменьшение притока опорной, тактильной и проприоцептивной афферентации, обусловленное уменьшением мышечной активности и опорной разгрузкой, меняет характер функционирования мультисенсорных вестибулярных ядер, что сопровождается изменением центральных межсенсорных взаимодействий [13], снижая качество выполнения точностных движений рук.

Использование наземной модели гравитационной разгрузки позволило, во-первых, набрать достаточно большую выборку испытуемых ($n > 10$ в каждой группе), во-вторых, проводить измерения у всех испытуемых с одинаковой периодичностью, что зачастую затруднительно в условиях КП, и, в-третьих, провести лонгитюдные исследования, невозможные, например, при использовании парадигмы параболического полета. В результате можно с уверенностью утверждать, что нарушения при выполнении предложенных циклических моторных задач ограничиваются первым днем СИ (ошибки оценки направления вертикального отрезка с открытыми глазами для группы СИ-5), что хорошо согласуется с наблюдениями того, что точность движений в наибольшей степени ухудшается в начальный период адаптации к изменению гравитации, затем восстанавливаясь к исходным значениям [29]; ориентационные иллюзии, свидетельствующие о по-

степенном процессе адаптации космонавта к микрогравитации, также наиболее выражены в первые часы полета [3]. Адаптация к выполнению других, дискретных, зрительно-моторных задач, в которых, предположительно, используются иные механизмы контроля движений руки [30], может занимать и большее время. Так, характеристики зрительно-мануального слежения переменны на протяжении всей 7-суточной СИ [13], снижаются на третий и пятый день 5-суточной СИ [31], сила иллюзии Мюллер-Лайера при ее моторной оценке снижается на пятый день 5-суточной СИ [32] и на десятый день 21-суточной СИ [33].

Избирательность влияния как условий опыта, так и СИ на степень переоценки длины отрезков или на оценку направления движения, косвенно свидетельствует о преимущественно векторном кодировании движений ведущей руки [34, 35], причем в рамках такого кодирования на этапе планирования движения раздельно представлены направление и амплитуда движения [14, 35].

ВЫВОДЫ

1. Исследовано влияние СИ различной продолжительности (6 ч, 5 сут) на циклические движения руки, воспроизводящие длину и ориентацию горизонтальных и вертикальных отрезков, при наличии и отсутствии зрительной обратной связи. Показано, что выполнение задачи оценки вертикальных отрезков сопровождается большими ошибками, чем задача оценки горизонтальных. В то время как точность движений испытуемых контрольной группы не зависела от номера измерения, точность движений испытуемых, находящихся в СИ, уменьшалась в первый день СИ: увеличивалась как переоценка длины горизон-

тальных отрезков, так и ошибка оценки направления вертикальных отрезков.

2. Полученные данные убедительно свидетельствуют о том, что пребывание в СИ влияет не только на работу позно-тонической системы, но и на систему управления движениями рук. Таким образом, СИ может рассматриваться как подходящая наземная модель для исследования нарушений точностных движений, наблюдаемых в условиях микрогравитации.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены Комиссией по биомедицинской этике Института медико-биологических проблем РАН (Москва). (Протокол № 401 от 15 июля 2015 г.; № 432 от 14 сентября 2016 г.).

Информированное согласие. Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Финансирование работы. Исследования с участием испытуемых контрольной группы выполнены за счет гранта РФФИ 22-18-00074, исследования в условиях “сухой” иммерсии с участием испытуемых выполнены за счет РФФИ 19-15-00435.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Takacs E., Barkaszi I., Czigler I. et al. Persistent deterioration of visuospatial performance in spaceflight // *Sci. Rep.* 2021. V. 11. № 1. P. 9590.
2. Weber B., Proske U. Limb position sense and sensorimotor performance under conditions of weightlessness // *Life Sci. Space Res.* 2022. V. 32. P. 63.
3. Kornilova L.N. Orientation illusions in spaceflight // *J. Vestib. Res.* 1997. V. 7. № 6. P. 429.
4. Mechtcheriakov S., Berger M., Molokanova E. et al. Slowing of human arm movements during weightlessness: the role of vision // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2002. V. 87. № 6. P. 576.
5. 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.
6. Wollseiffen P., Klein T., Vogt T. Neurocognitive performance is enhanced during short periods of microgravity—Part 2 // *Physiol. Behav.* 2019. V. 207. P. 48.
7. Pandiarajan M., Hargens A.R. Ground-Based Analogs for Human Spaceflight // *Front. Physiol.* 2020. V. 11. P. 716.
8. Weber B., Panzirsch M., Stulp F., Schneider S. Sensorimotor performance and haptic support in simulated weightlessness // *Exp Brain Res.* 2020. V. 238. № 10. P. 2373.
9. Wang H., Duan J., Liao Y. et al. Objects Mental Rotation under 7 Days Simulated Weightlessness Condition: An ERP Study // *Front. Hum. Neurosci.* 2017. V. 11. P. 553.
10. Козловская И.Б. Гравитация и позно-тоническая двигательная система // *Авиакосм. и экол. мед.* 2017. Т. 51. № 3. С. 5.
11. Tomilovskaya E., Shigueva T., Sayenko D. et al. Dry Immersion as a Ground-Based Model of Microgravity Physiological Effects // *Front. Physiol.* 2019. V. 10. P. 284.
12. De Abreu S., Amirova L., Murphy R. et al. Multi-System Deconditioning in 3-Day Dry Immersion without Daily Raise // *Front. Physiol.* 2017. V. 8. P. 799.
13. Корнилова Л.Н., Наумов И.А., Мазуренко А.Ю., Козловская И.Б. Зрительно-мануальное слежение и вестибулярная функция в условиях 7-суточной “сухой” иммерсии // *Авиакосм. и экол. мед.* 2008. Т. 42. № 5. С. 8.
14. Poh E., Carroll T.J., de Rugy A. Distinct coordinate systems for adaptations of movement direction and extent // *J. Neurophysiol.* 2017. V. 118. № 5. P. 2670.
15. Oldfield R.C. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory // *Neuropsychologia.* 1971. V. 9. № 1. P. 97.
16. Bringoux L., Blouin J., Coyle T. et al. Effect of gravity-like torque on goal-directed arm movements in microgravity // *J. Neurophysiol.* 2012. V. 107. № 9. P. 2541.
17. Scheidt R.A., Ghez C. Separate adaptive mechanisms for controlling trajectory and final position in reaching // *J. Neurophysiol.* 2007. V. 98. № 6. P. 3600.
18. Bock O., Eckmiller R. Goal-directed arm movements in absence of visual guidance: evidence for amplitude rather than position control // *Exp. Brain Res.* 1986. V. 62. № 3. P. 451.
19. Smyrnis N., Mantas A., Evdokimidis I. “Motor oblique effect”: perceptual direction discrimination and pointing to memorized visual targets share the same preference for cardinal orientations // *J. Neurophysiol.* 2007. V. 97. № 2. P. 1068.
20. Аллаxвердов В.М. Как сознание решает задачи научения и заучивания // *Российский психологический журнал.* 2005. Т. 2. № 1. С. 13.
21. Papaxanthis C., Pozzo T., Popov K.E., McIntyre J. Hand trajectories of vertical arm movements in one-G and zero-G environments. Evidence for a central representation of gravitational force // *Exp. Brain Res.* 1998. V. 120. № 4. P. 496.
22. Milner A.D. How do the two visual streams interact with each other? // *Exp. Brain Res.* 2017. V. 235. № 5. P. 1297.
23. Mikellidou K., Thompson P. The vertical-horizontal illusion: assessing the contributions of anisotropy, abutting, and crossing to the misperception of simple line stimuli // *J. Vis.* 2013. V. 13. № 8. P. 7.
24. Dopkins S., Galyer D. Horizontal-vertical anisotropy with respect to bias and sensitivity // *J. Vis.* 2020. V. 20. № 7. P. 1.

25. Villard E., Garcia-Moreno F.T., Peter N., Clément G. Geometric visual illusions in microgravity during parabolic flight // *Neuroreport*. 2005. V. 16. № 12. P. 1395.
26. Lathan C., Wang Z., Clément G. Changes in the vertical size of a three-dimensional object drawn in weightlessness by astronauts // *Neurosci. Lett*. 2000. V. 295. № 1–2. P. 37.
27. Kim H., O'Sullivan D., Camurri A. et al. Effect of stress on hand movement in a laboratory setting among high school students: preliminary research // *Hum. Mov.* 2022. V. 23. № 2. P. 28.
28. Jamšek M., Kunavar T., Blohm G. et al. Effects of Simulated Microgravity and Hypergravity Conditions on Arm Movements in Normogravity // *Front. Neural Circuits*. 2021. V. 15. P. 750176.
29. Papaxanthis C., Pozzo T., McIntyre J. Kinematic and dynamic processes for the control of pointing movements in humans revealed by short-term exposure to microgravity // *Neuroscience*. 2005. V. 135. № 2. P. 371.
30. Wiegel P., Kurz A., Leukel C. Evidence that distinct human primary motor cortex circuits control discrete and rhythmic movements // *J. Physiol.* 2020. V. 598. № 6. P. 1235.
31. Корнилова Л.Н., Наумов И.А., Глухих Д.О. Зрительно-мануальное слежение в условиях 5-суточной иммерсии // *Авиакосм. и экол. мед.* 2011. Т. 45. № 6. С. 8.
32. Соснина И.С., Ляховецкий В.А., Зеленский К.А. и др. Влияние 5-суточной “сухой” иммерсии на силу иллюзий Понзо и Мюллер-Лайера // *Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова*. 2018. Т. 68. № 3. С. 313.
33. 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
34. De Graaf J.B., van der Gon J.J., Sittig A.C. Vector coding in slow goal-directed arm movements // *Percept. Psychophys.* 1996. V. 58. № 4. P. 587.
35. Ляховецкий В.А., Боброва Е.В. Воспроизведение запомненной последовательности движений правой и левой руки: позиционное и векторное кодирование // *Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова*. 2009. Т. 59. № 1. С. 45.

Influence of Dry Immersion on the Characteristics of Cyclic Precise Hand Movements

V. A. Lyakhovetskiy^{a, *}, I. S. Zelenskaya^{a, b, **}, V. Yu. Karpinskaya^a,
M. P. Bekreneva^b, K. A. Zelenskiy^b, E. S. Tomilovskaya^b

^a*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

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

*E-mail: v_la2002@mail.ru

**E-mail: radostniyden@mail.ru

The characteristics of precise hand movements in dry immersion (DI) have been studied. Motor tasks were cyclic single-joint hand movements corresponding to the length and orientation of the presented horizontal or vertical segment, carried out for 5 s with or without visual feedback. The studies were carried out with the participation of 35 test subjects divided into three groups: control (n = 10), 6-hour DI (n = 11), and 5-day DI (n = 14). In the control group, the test was carried out three times, lying on the couch, imitating the schedule of a 6-hour DI – once before DI, in the morning on the day of DI and in the evening 2 hours after the end of exposure. In the 5-day DI, tests were performed once before the start of the DI, on the 1st, 3rd, and 5th days of the DI, and also once after its completion. It is shown that the accuracy of movements in the control group does not depend on the measurement, while in the experimental groups on the first day of DI there is an increase in the overestimation of the length of horizontal segments and an increase in the error in estimating the direction of vertical segments. The data indicate that DI affects the hand movement control system and can be considered as a suitable Earth model for studying fine movement disorders observed in microgravity.

Keywords: hand movements, dry immersion, gravity.