

## МЕХАНИЗМЫ ТРАНСФОРМАЦИИ ДВИГАТЕЛЬНЫХ НАВЫКОВ В УСЛОВИЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СРЕДЫ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ У ЗДОРОВЫХ ЛИЦ

Белорусская медицинская академия последипломного образования,  
кафедра рефлексотерапии, Минск, Беларусь

---

В современных тренирующих симуляторах все чаще используется среда виртуальной реальности, посредством которой в мозге формируются «жесткие» связи, позволяющие эффективно организовывать процесс обучения новым двигательным навыкам. В работе выполнен сравнительный анализ степени трансформации двигательного стереотипа шагового движения у здоровых лиц с использованием среды виртуальной реальности дозируемой в стандартизированном режиме. Все обследуемые были разделены на две группы, в одной из которых использовалась стандартизированная среда виртуальной реальности для устранения средовых помех. В качестве объективизации степени трансформации двигательного стереотипа шагового движения использована система видеоанализа, позволяющая идентифицировать качественные параметры стандартизированного движения «Step» в виде коэффициента полезности движений и его интегральных составляющих: коэффициента нецеленаправленных движений и коэффициента целенаправленных движений. В результате исследования установлено, что виртуальная реальность у здоровых лиц в дозируемом режиме оптимизирует пространственное ориентирование сложных локомоций на этапе формирования моторной программы, о чем свидетельствует достоверное снижение коэффициента целенаправленных движений. При этом увеличение количества нецеленаправленных движений свидетельствует о росте стабилизирующих моторных эфферентаций корригирующих центральную программу. Вероятным механизмом, обуславливающим рост нецеленаправленных движений, может являться процесс сенсорной дезинтеграции между афферентами информационных каналов зрительного вестибулярного и проприоцептивного анализаторов. Установлено, что при значении коэффициента целенаправленных движений ( $P_{sign}$ ) ниже 7150,7 средовая энтропия может считаться оптимальной для запуска процесса формирования новых моторных навыков; при значении коэффициента нецеленаправленных движений ( $P_{noise}$ ) выше 91,1 может констатироваться дезинтеграция в системе сенсорного синтеза.

**Ключевые слова:** пространственное ориентирование, тренирующие симуляторы, специфическая среда виртуальная реальность, эффективность сложных локомоций, коэффициент целенаправленных движений, коэффициент нецеленаправленных движений.

**V. A. Lukashovich**

### TRANSFORMATION MECHANISMS OF VIRTUAL REALITY FOR MOTOR SKILLS AT HEALTHY

Modern coaching simulators are increasingly used virtual reality environment through which in the brain are formed «hard communication» to effectively organize the process of learning of new motor skills. The paper made a comparative analysis of the degree of transformation of the step motor stereotype in healthy volunteers which using specific virtual reality environment in a standardized

## □ Оригинальные научные публикации

*dosage. All the subjects were divided into two groups, one of which used a standardized virtual reality environment for the elimination of environmental noise. As the degree of objectification of movement transformation was used a motion video analysis system which allows identifying the quality parameters of standardized movements «Step» in the form of efficiency of movement and its integrated components: the purposeful movements and unpurposeful movements. The study found that virtual reality in healthy subjects in dosed mode optimizes the spatial orientation of complex locomotion at the stage of motor programs, as evidenced by the significant reduction of purposeful movements. This way increasing of the number of unpurposeful movements correspond the growth of stabilizing motor efferentations in the form of central corrective programs. The likely mechanism leads for growth of unpurposeful movements may be a process of disintegration of the sensory afferents information between the visual, vestibular and proprioceptive canals. Specified if  $P_{sign} 7150,7$  lower than  $7150,7$  it is a criteria of optimal launching of process of forming new motor skills; When  $P_{noise}$  less than  $91,1$  it could be a criteria of disintegration in the field of sensory synthesis.*

**Key words:** *space orientation, coaching simulators, specific virtual reality environment, the effectiveness of complex locomotion, index of purposeful movements, index of unpurposeful movements.*

В настоящее время отмечается рост технологий направленных на формирование новых двигательных навыков с использованием среды виртуальной реальности (СВР). Способствующим фактором в реализации подобных технологий является развитие аппаратно-программных комплексов, позволяющих имитировать процесс управления каким-либо событием. Для обозначения подобных устройств используется общий термин – симуляторы. Данный термин охватывает также компьютерные игры и подразумевает наличие процесса управления определенным механизмом в некоем средовом окружении. Симуляторы разделяются на:

- 1) игровые и
- 2) тренирующие.

При этом тренирующие симуляторы могут быть:

- 1) спортивными,
- 2) медицинскими и
- 3) специальными.

Технологии выработки новых моторных навыков используются в группе тренирующих средств, при этом методологические различия формируют специфику практического использования данной технологии. В качестве искусственно трансформируемой среды, как правило, используется СВР. Последняя, в свою очередь, может быть представлена в следующих вариантах:

- 1) в виде ограниченной двухмерной 2D картины;
- 2) в виде полноценной трехмерной 3D **средовой модели**.

Для визуализации ограниченной СВР используются различного рода экраны, например мониторы компьютеров. Для коммуникаций в полноценной СВР разработаны специальные устройства – визуализаторы в виде очков (Zeiss, Oculus). В специальных симуляторах для визуализации пространственного окружения используются специальные кабины, на стены которых проецируются события СВР, что формирует иллюзию 3D. Подобные визуализаторы обозначаются как 3D эмуляторы. К эмуляторам стоит относить экраны, раскладывающие визуальную картину в стерео режим. Вместе с тем специфическая (симулирующая управление строго определенным процессом в инвариантных словиях) СВР достаточно давно используется в специальных тренажерах. Ее внедрение в группу медицинских симуляторов остается открытым вопросом по причине отсутствия четких данных влияния на процессы нейрональной организации мозга лиц с заболеваниями ЦНС. Практический поиск инноваций

в нейрореабилитации при этом опережает процесс развития идей использования специфической СВР [1–10].

Таким образом, перспективным направлением в системе выработки новых моторных навыков является дозированное использование специфической СВР. Актуальность данного направления обусловлена ростом эффективности в системе управления сложными локомоциями человека в условиях виртуальной реальности. Актуальность работы продиктована поиском нейрофизиологических механизмов способствующих формированию качественно новых схем работы ЦНС.

### Цели исследования:

1. Поиск нейрофизиологических механизмов определяющих специфику сложной локомоции здоровых лиц в условиях специфической среды виртуальной реальности.
2. Идентификация достоверных маркеров отражающих процесс трансформации двигательного стереотипа в условиях специфической среды виртуальной реальности.

### Материалы и метод

В исследовании принимала участие группа здоровых добровольцев, состоящая из 50 юношей в возрасте от 17 до 18 лет, с ростом  $174,1 [178,7/171,2]$  см, весом  $71,2 [76,9/67,1]$  кг. Никто из обследованных добровольцев не предъявлял каких-либо жалоб на патологическое состояние со стороны локомоторной системы, на болезненное состояние со стороны внутренних органов и вестибулярной системы, в том числе головокружение.

Все испытуемые были обследованы с использованием системы видеонализа движений «iMotion» (производство компании «Интеллект Моушн», РФ) при выполнении функционально усложненного шагового движения «Step» с выделением интегральных показателей: коэффициента целенаправленных движений ( $P_{noise}$ ); коэффициента целенаправленных движений ( $P_{sign}$ ); коэффициента полезности движения (КПДв), отражающих нейробиомеханические аспекты эффективности сложной локомоции. Пациентами выполнялся функционально усложненный вариант шаговой локомоции в варианте «Step» на платформу высотой 220 мм. В ходе выполнения функционально усложненного шагового движения «STEP» происходит перемещение общего центра масс с одной опорной ноги на другую, из области одного опорного контура в опорный контур другой соответствующей ноги, через больший опорный контур периода двойной опоры, вместе с тем горизонтальные колебания принимают возвратно – по-

ступательный вид. При этом в самом движении «STEP», поочередно в цикле правой и левой ноги период одиночной опоры сменяется периодом двойной опоры. Суммарно во временной развертке движение общего центра масс приобретает вид синусоиды, характеризующейся гармоничностью. Момент отрыва левой стопы от пола в фазе левой ноги – является точкой начала регистрации данных видеоряда, окончания регистрации данных является точкой перехода периода переноса вниз левой ноги в период нижней двойной опоры.

Шаговая локомоция фиксировалась во фронтальной плоскости на WEB камеру, интегрированную с программным пакетом. Камера располагалась непосредственно перед пациентом на расстоянии 3 метра, и, в режиме on-line, фиксировала перемещение в 3D пространстве маркерного блока закрепленного в области относительной проекции общего центра масс – место пересечения средней линии и линии, соединяющей передне-верхние ости подвздошных костей. При этом выполнение теста совмещалось со СВР, в которой, помимо виртуальной ступеньки, испытуемый визуализировал стандартизированное виртуальное окружение в виде «нейтрального ландшафта». Подобное решение позволяет не только стандартизировать условия внешней среды для всех пациентов, но и исключить влияние фоновых средовых факторов, видоизменяющих стереотип шагового движения. В качестве визуализатора СВР использовалась технология «Oculus».

Интерпретация данных в реальном времени происходит с помощью стандартной WEB-камеры совместно с разработанным алгоритмом. Камера отслеживает 3D координаты светодиодов, а программное обеспечение фиксирует движение тела, восстанавливая пространственную траекторию перемещения с точностью до 0,2 см и временем отклика 10–20 мс. Контроллер имеет три светодиодных индикатора для создания положения тела в 3D-пространстве и определяет X, Y и Z координаты, а также угол поворота плоскости и высоты. Пространственное позиционирование помимо оптического канала усилено дополнительными сенсорами в виде акселерометров и гироскопов. Устройство так же имеет Bluetooth – канал обратной связи, усиливающий сенсорный поток от СВР и передающий информацию на вибродатчики, что позволяет обеспечить тактильную обратную связь в виде «сенсорной интенсификации» для возможности чувствовать ход виртуального события.

Настоящее исследование посвящено изучению влияния СВР на здоровых добровольцев, которые были разделены на две группы. В группе № 1 (n = 28) исследование двигательного стереотипа шагового движения осуществлялось без использования СВР, в группе № 2 (n = 22) с таковой. Статистический анализ полученных результатов проводился в программном пакете «Statistica 8,0». Полученные в ходе исследования данные представлены в виде медианы (Me), верхнего (UQ) и нижнего (LQ) квартилей: Me [UQ/LQ]. При сравнении двух независимых групп использовали критерий Манна-Уитни (M-U). Для определения корреляционных связей между явлениями использовали критерий Спирмана с коэффициентом корреляции (R). Альтернативная гипотеза принималась при уровне статистической значимости 0,05.

### Результаты и обсуждение

Результаты исследования представлены ниже отдельно по каждому интегральному показателю:

### 1. Показатель целенаправленных движений Psign.

В группе № 1 установлено значение показателя 7660,2 [8991,4\6111,3]. В группе № 2 при исследовании, значение показателя было 7150,7 [8299,9\5133,1]. Сравнительный анализ значений показателя между группами выявил достоверные различия (при p = 0,042): в группе № 2 Psign достоверно меньше аналогичного показателя в группе № 1 (по критерию Спирмана, p < 0,05) с коэффициентом корреляции R = -0,330. Результаты представлены в таблице № 1.

Таблица 1. Сравнительный анализ коэффициента целенаправленных движений (Psign) в обследуемых группах в вариантах с двухслойным экзоскелетом и без него

| Группы                       |    | Результаты |
|------------------------------|----|------------|
| Группа № 1 (без ВР) n = 28   | Me | 7660,2     |
|                              | UQ | 8991,4     |
|                              | LQ | 6111,3     |
| Группа № 2 (с ВР) n = 22     | Me | 7150,7     |
|                              | UQ | 8299,9     |
|                              | LQ | 5133,1     |
| p (M-U)                      |    | 0,042      |
| Коэффициент R при (p < 0,05) |    | -0,330     |

### 2. Показатель нецеленаправленных движений Pnoise.

В группе № 1 при исследовании установлено значение показателя 49,3 [91,1\40,7], который достоверно различался с таковым (при p = 0,028) в группе № 2, где его значение было 61,9 [95,3\52,2]. При этом в группе № 2 Pnoise достоверно превышает аналогичный показатель в группе № 1 (по критерию Спирмана, p < 0,05) с коэффициентом корреляции R = 0,390. Результаты представлены в таблице № 2.

Таблица 2. Сравнительный анализ коэффициента нецеленаправленных движений (Pnoise) в обследуемых группах в вариантах с двухслойным экзоскелетом и без него

| Группы                       |    | Результаты |
|------------------------------|----|------------|
| Группа № 1 (без ВР) n = 28   | Me | 49,3       |
|                              | UQ | 91,1       |
|                              | LQ | 40,7       |
| Группа № 2 (с ВР) n = 22     | Me | 61,9       |
|                              | UQ | 95,3       |
|                              | LQ | 52,2       |
| p (M-U)                      |    | 0,028      |
| Коэффициент R при (p < 0,05) |    | 0,390      |

### 3. Показатель КПДв (коэффициент полезности движений).

В группе № 1 значение показателя равно 0,8 [1,0\0,6]. Во второй группе значение показателя составило 0,9 [1,1\0,7]. При сравнительном анализе значений показателя между группами установлены достоверные различия (при p = 0,022): в группе № 2 КПДв достоверно превышает аналогичный показатель в группе № 1 (по критерию Спирмана, p < 0,05) с коэффициентом корреляции R = 0,384. Результаты представлены в таблице № 3.

Полученные данные указывают на то, что выполнение диагностического движения в условиях виртуальной

## Оригинальные научные публикации

Таблица 3. Сравнительный анализ коэффициента полезности движения (КПДв) в обследуемых группах в вариантах с двухслойным экзоскелетом и без него

| Группы                       |    | Результаты |
|------------------------------|----|------------|
| Группа № 1 (без ВР) n = 28   | Me | 0,8        |
|                              | UQ | 1,0        |
|                              | LQ | 0,6        |
| Группа № 2 (с ВР) n = 22     | Me | 0,9        |
|                              | UQ | 1,1        |
|                              | LQ | 0,7        |
| p (M-U)                      |    | 0,022      |
| Коэффициент R при (p < 0,05) |    | 0,384      |

реальности приводит к достоверному снижению коэффициента целенаправленных движений (Psign), что указывает на более эффективный путь запуска моторной программы при использовании СВР, что вероятнее всего, связано со стандартизированным ограничением средовых вариативностей топологического поля. Другими словами повышение энтропии топологического поля будет способствовать усложнению запускаемой моторной программы и прогностическому росту количества целенаправленных движений. При этом СВР способствует запуску более быстрых коммуникативных путей, обмен информации по которым способствует стабилизации «внутренней схемы тела», как основного элемента системы сенсорного синтеза.

В ходе исследования также установлено, что СВР способствует достоверному увеличению количества нецеленаправленных движений (Pnoise), являющихся результатом запуска корректирующих программ, способствующих стабилизации биокинематической модели и возникающих за счет ситуационного пересмотра вилки поструральных констант. Специфика подобных трансформаций может обуславливаться специфичной структурой матрицы «внутренней схемы тела», которая изначально является нестабильной: дискретность трансформаций внутренней модели тела человека прямо пропорциональна уровню внешнесредовой репеллерности и обратно пропорциональна скачкам качественных параметров отдельных факторов. Выявленные закономерности распределения показателя нецеленаправленных движений обуславливаются сенсорной дезинтеграцией, развивающейся за счет потери визуального контроля над пространственным перемещением частей собственного тела и визуальной привязкой к топологическому (внешнему) полю.

Трансформация коэффициента полезности движений (КПДв) отражает динамику целенаправленных и нецеленаправленных движений, так как он является их результирующим показателем. Значения показателя коррелируют с вышеописанными закономерностями.

### Выводы

Практическое использование специфической среды виртуальной реальности в стандартизированном режиме может считаться оправданным в условиях формирования двигательных навыков при использовании тренирующих симуляторов. Нейрофизиологический эффект использования виртуальной реальности может быть объяснен повышением эффективности межнейронных связей, формирующих коммуникативные пути, объединяющие процесс сенсорного синтеза.

Таким образом, в ходе проведенного исследования установлено:

1. Виртуальная реальность у здоровых лиц в дозируемом режиме оптимизирует пространственное ориентирование сложных локомоций на этапе формирования моторной программы, о чем свидетельствует достоверное снижению коэффициента целенаправленных движений (Psign). При этом увеличение количества нецеленаправленных движений (Pnoise) свидетельствует о росте стабилизирующих моторных эфферентаций корректирующих центральную программу. Вероятным механизмом, обуславливающим рост нецеленаправленных движений, может являться процесс сенсорной дезинтеграции между афферентами информационных каналов зрительного вестибулярного и проприоцептивного анализаторов.

2. Для количественной оценки степени трансформации сложной локомоции человека в условиях ее реализации в специфической среде виртуальной реальности целесообразно использование следующих объективных показателей:

Коэффициента целенаправленных движений (Psign) в качестве критерия эффективного использования условий внешней среды. С другой стороны данный показатель может определять уровень средовой энтропии: при его значении ниже 7150,7 средовая энтропия может считаться оптимальной для запуска процесса формирования новых моторных навыков.

Коэффициента нецеленаправленных движений (Pnoise) в качестве критерия сенсорной дезинтеграции: при его значении выше 91,1 может быть констатирована дезинтеграция в системе сенсорного синтеза.

### Литература

1. Guley, S. P., Rasch E. K., Chan L. (2011) Ongoing coverage for ongoing care: access, utilization, and out-of-pocket spending among uninsured working-aged adults with chronic health care needs. *Am. J. Public Health*, vol. 101, pp. 368–375.
2. Lloyd-Jones, R. J., Adams T. M. (2010) Brown Heart disease and stroke statistics—2010 update. *American heart association Circulation*, vol. 121, no. 7, pp. 46–215.
3. Schmidt, H., Werner C., Bernhardt R., Hesse S., Krüger J. (2007) Gait rehabilitation machines based on programmable footplates. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 4, no. 2, pp. 20–47.
4. Chan, D. Y. L., Chan C. C. H., Au D. K. S. (2006) Motor relearning programme for stroke patients: a randomized controlled trial. *Clinical Rehabilitation*, vol. 20, no. 3, pp. 191–200.
5. Wernig, A., Muller S., Nanassy A., Cagol E. (1995) Laufband therapy based on «rules of spinal locomotion» is effective in spinal cord injured persons. *European Journal of Neuroscience*, vol. 7, no. 4, pp. 823–829.
6. Galvez, J. A., Reinkensmeyer D. J. (2005) Robotics for gait training after spinal cord injury. *Spinal Cord Injury Rehabilitation*, vol. 11, no. 2, pp. 18–33.
7. Wirz, M., Zemon D. H., Rupp R. (2005) Effectiveness of automated locomotor training in patients with chronic incomplete spinal cord injury: a multicenter trial. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 86, no. 4, pp. 672–680.
8. Freivogel, S., Mehrholz J., Husak-Sotomayor T., Schmalohr D. (2008) Gait training with the newly developed «LokoHelp»-system is feasible for non-ambulatory patients after stroke, spinal cord and brain injury. A feasibility study. *Brain Injury*, vol. 22, no. 7, pp. 625–632.
9. Freivogel, S., Schmalohr D., Mehrholz J. (2009) Improved walking ability and reduced therapeutic stress with an electro-mechanical gait device. *Journal of Rehabilitation Medicine*, vol. 41, no. 9, pp. 734–739.
10. Hesse, S., Uhlenbrock D. (2000) A mechanized gait trainer for restoration of gait. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, vol. 37, no. 6, pp. 701–708.

Поступила 19.06.2015 г.