

Применение технологии виртуальной реальности при восстановлении движений в паретичной руке у больных, перенесших инсульт

*Л. А. Черникова¹, М. Е. Иоффе², М. Е. Курганская², О. А. Мокиенко³,
Н. А. Кацуба¹, К. И. Устинова⁴, Р. А. Прокопенко², А. А. Фролов²*

¹НЦН РАМН, ²Институт высшей нервной деятельности РАН, ³факультет фундаментальной медицины МГУ, ⁴Центральный мичиганский университет, США

В России ежегодно происходит более 400 тыс. инсультов [4, 10].

Наиболее частыми последствиями инсульта являются двигательные нарушения в виде гемипарезов. Поэтому одним из важнейших научно-практических направлений современной неврологии является поиск новых методов восстановления движения. Среди таких методов очень перспективны технологии, обеспечивающие имитацию реальной действительности. Использование технологий виртуальной реальности (VR) в нейрореабилитации позволяет значительно повысить функциональную активность больных и восполнить недостающие компоненты успешной реабилитационной программы [9]. Среда, максимально приближенная к реальной, активно вовлекает больного в процесс реабилитации, обеспечивая обратную связь во время выполнения большого числа повторов целенаправленных движений [5]. Важно, что занятия могут проводиться как в клинике, так и в домашних условиях [9].

К настоящему времени уже накоплен некоторый положительный опыт использования технологий VR для восстановления двигательных функций у пациентов с постинсультным гемипарезом.

Показана возможность применения метода у пациентов в подострой стадии инсульта [12], в раннем и позднем восстановительном периодах [11], а также в резидуальном (от 1 до 5 лет после инсульта) реабилитационном периоде [8, 11]. Вместе с тем многие вопросы, связанные с применением этой технологии в реабилитации больных, перенесших инсульт, требуют уточнения.

Цель настоящего исследования заключалась в изучении эффекта двигательного обучения с применением технологий VR у пациентов с постинсультным парезом руки.

Материалы и методы

Под нашим наблюдением находилось 47 человек в возрасте 21—76 лет (средний возраст 53,2 [47; 64] года), со средней давностью заболевания 8 [5; 15] мес. Степень пареза руки по Motor Assessment Scale (MAS) в среднем составила 10 [5; 17] баллов.

По объему восстановительной терапии пациенты были разделены на 2 группы. В контрольную были включены 23 пациента, получавших традиционный курс лечебных мероприятий, включавший массаж, нейромышечную электростимуляцию и процедуры ЛФК. Основную группу составили 24 пациента, которым, помимо традиционных методов лечения, проводили тренировки паретичной руки в условиях VR (10 процедур длительностью по 20—30 мин). Обе группы были сопоставимы по возрасту, давности инсульта и тяжести неврологического дефицита.

Для обучения точным движениям рук в условиях технологии VR использовалась аппаратура PlayStation II с видеовводом изображения через цветную цифровую видеокамеру и анимационная компьютерная программа EyeToy Play-3, созданные корпорацией "Sony". Цифровая видеокамера подключается к USB-порту PlayStation II и, используя технологию распознавания образов и цветов, позволяет пациентам передавать команды при помощи собственных движений. Камера устанавливается на экране телевизора. Оптимальное расстояние

Информация для контакта: Черникова Людмила Александровна — зав. отд. нейрореабилитации и физиотерапии НЦН, д-р мед. наук, проф., тел. 8(495)4902502, e-mail: luda_cher44@mail.ru; Иоффе Марат Евсеевич — рук. лаб. двигательного обучения, Ин-т высшей нервной деятельности и нейрофизиологии (ИВНДН) РАН, д-р мед. наук, проф., тел. 8(495)334-77-49, e-mail: labdo@mail.ru; Курганская Марина Евгеньевна — ст. науч. сотр. лаб. двигательного обучения, ИВНДН, канд. биол. наук, e-mail: marina@netadress.com; Мокиенко Олеся Александровна — аспирант лаб. математического моделирования систем обучения, ИВНДН, e-mail: lesik-Olesik@yandex.ru; Кацуба Надежда Анатольевна — инструктор-методист ЛФК, отд. нейрореабилитации и физиотерапии НЦН, e-mail: len_kazuba@yandex.ru; Устинова Ксения Ивановна — канд. пед. наук, Assistant Professor, Doctoral Program in Physical Therapy, Central Michigan University, Mt. Pleasant, MI 48858, tel.: (989)774-2699, e-mail: ustink@cmich.edu; Фролов Александр Алексеевич — зав. лаб. математического моделирования систем обучения, д-р биол. наук, проф., e-mail: aafrolov@mail.ru. Прокопенко Роман Александрович — науч. сотр. лаб. математического моделирования систем обучения, канд. физ.-мат. наук, e-mail: rprok@mai.ru.

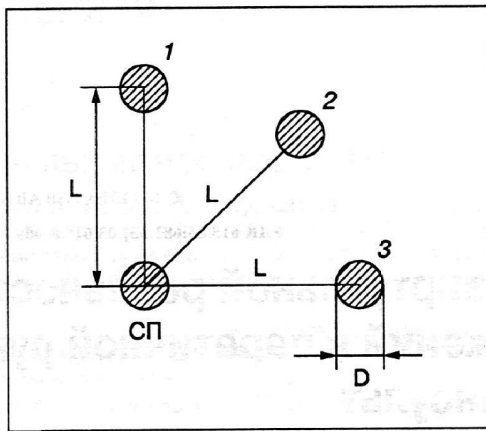


Рис. 1. Расположение стартовой позиции и целей.

СП — стартовая позиция; L — расстояние от стартовой позиции до целей 35 см; D — диаметр цели 2 см. Стрелками показаны направление и последовательность движений испытуемого.

до камеры определяется с помощью рамки, которая появляется на экране.

Во время тренинга пациент становился участником игры, в процессе которой он должен был бросать шар, имитируя игру в боулинг. Для этого больной, стоя перед монитором, должен был поднять паретичную руку вверх и вытянуть вперед, пытаясь совместить кисть с изображением шара на экране. При этом больной получал инструкцию стараться не сгибать руку в локтевом суставе и совершать движение как можно быстрее, чтобы за определенный отрезок игрового времени набрать максимальное количество шаров. При совмещении кисти и изображения шара последний начинал стремительно двигаться на экране монитора в сторону цели (при этом имело значение направление и ускорение движения руки). Тренировка проводилась по 20—30 мин 5 раз в неделю, курс лечения состоял из 10 тренировок. Эта игра была направлена на тренировку проксимальных отделов руки, тренировку скорости и точности движения.

У всех больных до начала лечения и после его окончания для оценки степени пареза в руке использовалась шкала MAS. Помимо клинической оценки у 19 из 24 больных основной группы до начала лечения и после его окончания определяли биомеханические параметры движения руки. Использовалась электромагнитная система Mini Birds ("Ascension Technology Corporation", США), в которой регистрация движений руки производилась с помощью электромагнитного сенсора, прикрепленного к ногтю указательного пальца пораженной руки. Система позволяла измерять пространственное положение датчика с точностью $\pm 0,5$ мм при частоте оцифровки сигнала 66,6 Гц.

Во время регистрации движения больной стоял перед бумажным постером, на котором были обозначены стартовая позиция и три цели, представляющие собой круги диаметром 2 см каждый, расположенные в трех различных направлениях: вертикально вверх (цель 1), вверх и в сторону (цель 2) и горизонтально в сторону (цель 3). Постер с целями помещался на такой высоте, чтобы стартовая позиция оказалась на уровне пояса больного, и на таком расстоянии, чтобы пациент мог совместить

указательный палец со стартовой позицией, слегка согнув руку в локте. Цели располагались справа для пациентов, выполнявших движения правой рукой, и слева для тех, кто выполнял их левой. Расположение целей по отношению к стартовой позиции, характерные расстояния и последовательность движений показаны на рис. 1. По команде "приготовиться" пациент ставил кончик указательного пальца в стартовую позицию и по звуковому сигналу от компьютера доставал последовательно до каждой из целей, всякий раз возвращая палец в стартовую позицию. Всего предлагалось выполнить 10 таких проб, однако пациент мог в любой момент прервать выполнение движений, если чувствовал усталость. Тестирование проводилось 2 раза: до и после окончания курса тренинга с использованием технологии ВР.

В обработку включали записи значений трех пространственных координат рабочей точки (кончика указательного пальца) x , y , z в последовательные моменты времени (частота оцифровки составляла 66,6 Гц). Оси координат были выбраны таким образом, что ось x была направлена в горизонтальном направлении, а оси y и z — соответственно вверх и в направлении испытуемого (рис. 2).

С использованием зависимости пространственных координат от времени вычислялись систематические ошибки попадания в цель, степени кривизны траектории движения и временные параметры: время от момента подачи сигнала до начала движения (время реакции); время удержания руки на стартовой позиции и на целях, а также время движения.

Статистическая обработка клинических результатов проводилась с помощью пакета прикладных программ Statistica 8.0 ("StatSoft", 2003), использовался непараметрический метод анализа, в том числе вычислялись test Sigh (критерий знаков) при сравнении зависимых групп, U-тест (критерий Манна—Уитни) при сравнении независимых групп, а также коэффициент корреляции r Спирмена при анализе связей между двумя признаками.

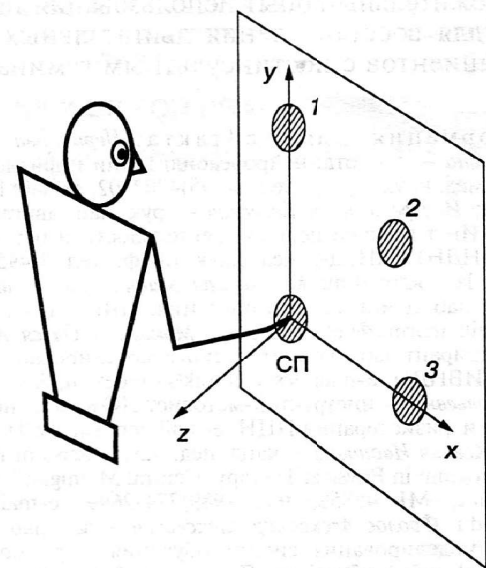


Рис. 2. Взаимное расположение испытуемого и целей и выбранная система координат.

Таблица 1

Изменение показателей двигательной функции руки по шкале MAS (в баллах) под влиянием курса реабилитации

Группа больных	До	После	<i>p</i>
Основная	8,5 [2,5; 16,5]	14,5 [6,5; 19,0]	< 0,001
Контрольная	10,0 [6,0; 16,0]	13,0 [9,0; 17,0]	< 0,001

Примечание. Здесь и в табл. 2–4: все значения приведены в виде медианы (25-й процентиль; 75-й процентиль), *p* — уровень достоверности.

Данные представлены в виде медианы *Me* и 25-й, 75-й процентилями медианы. Статистически значимыми различия считались при $p < 0,05$. Биомеханические параметры анализировались при помощи многомерного дисперсионного анализа (MANOVA).

Результаты и обсуждение

Результаты клинических исследований

Для оценки клинической эффективности реабилитации пациентов с применением и без метода ВР был проведен сравнительный анализ восстановления двигательной функции в основной и контрольной группах. Оказалось, что статистически значимое улучшение двигательной функции руки (по шкале MAS) наблюдалось у пациентов обеих групп (табл. 1). Однако в основной группе показатели относительного улучшения двигательной функции руки были существенно выше (41,4%), чем в контрольной группе (23,1%).

При этом выявлялась зависимость степени улучшения двигательной функции от латерализации очага поражения. У больных с локализацией очага в левом полушарии степень улучшения двигательной функции руки была достоверно выше, чем при локализации очага в правом полушарии. Это касалось пациентов обеих изучаемых групп. Так, у больных с левосторонней локализацией очага относительное улучшение двигательной функции руки составило 53,3% в основной и 18,8% в контрольной группах, а при правосторонней локализации — 13,3 и 3,3% соответственно. Важно отметить, что у пациентов с локализацией очага в правом полушарии включение тренинга в условиях виртуальной реальности значимо повышало эффективность восстановительной терапии ($p < 0,001$).

Кроме того, в основной группе больных был проведен анализ степени восстановления движе-

ний отдельно для плеча, предплечья и кисти с помощью различных разделов шкалы MAS, позволяющей осуществлять оценку функции руки не только в целом, но и для каждого ее отдела. Выявлено статистически значимое улучшение движений в различных отделах верхней конечности после тренинга с применением технологии ВР (табл. 2). Таким образом, несмотря на то что сценарии виртуальных игр были направлены в основном на тренировку проксимальных отделов руки, значительное улучшение двигательной функции отмечалось и в дистальном отделе руки.

Результаты биомеханических исследований

С целью уточнения, за счет каких биомеханических характеристик происходит клиническое улучшение двигательной функции верхней конечности, в основной группе проведено биомеханическое исследование для оценки временных и пространственных параметров движения руки до и после курса лечения. При этом учитывались следующие параметры: точность попадания в цель, кривизна траектории движения и время выполнения двигательного задания.

Точность попадания в цель рассчитывалась по минимальному расстоянию от точки, которая была достигнута паретичной рукой больного при выполнении теста, до заданной цели. Уменьшение этого расстояния свидетельствует об улучшении точности попадания в цель. Статистически значимое уменьшение расстояния от достигнутой точки до цели обнаружено только для первой цели, расположенной вертикально вверх (табл. 3).

Малая результативность выполнения этого теста у больных с постинсультным парезом руки может быть связана с наличием в клинической картине пареза как в проксимальном, так и в дистальном отделе руки, а также патологической сгибательной синкинезии. Следовательно, улучшение данного показателя косвенно может свидетельствовать об уменьшении степени пареза и синкинезии. Необходимо подчеркнуть, что для достижения цели 1 больному необходимо было произвести движение паретичной рукой вертикально вверх, особенно сложное для выполнения при наличии пареза в руке. Кроме того, следует отметить, что сценарий компьютерных игр в условиях ВР был направлен именно на тренировку махового движения рукой вперед и вверх.

С целью изучения влияния реабилитационной терапии с включением тренинга в условиях ВР на траекторию движения руки оценивалось отноше-

Таблица 2

Динамика показателей двигательной функции руки по MAS (в баллах) для разных отделов руки до и после курса реабилитации

Отдел руки	Основная группа		Контрольная группа	
	до лечения	после лечения	до лечения	после лечения
Плечо	4,0 [2,0; 6,0]	5,2 [4,5; 6,0]**	4,17 [3,0; 6,0]	4,7 [4,0; 6,0]*
Предплечье	2,7 [1,0; 4,0]	3,9 [3,0; 6,0]**	3,7 [2,0; 5,0]	3,8 [3,0; 6,0]
Кисть	2,5 [0; 6,0]	3,5 [1,0; 6,0]*	2,6 [0; 5,0]	2,8 [0; 5,0]

Примечание. * — $p < 0,01$; ** — $p < 0,001$.

Таблица 3

Средние значения точности выполнения движения паретичной рукой (минимальное расстояние от достигнутой точки до цели, в см) для больных основной группы

Направление движения	До лечения	После лечения	<i>p</i>
Вертикально вверх (цель 1)	1,16 [0,39; 3,55]	0,60 [0,32; 1,76]	0,0401
Вверх по диагонали (цель 2)	1,95 [1,25; 3,16]	1,55 [1,05; 2,10]	0,0702
По горизонтальной плоскости в сторону (цель 3)	1,56 [0,61; 2,50]	1,06 [0,64; 1,94]	0,1165

ние проекции длины пути, который выполнял больной паретичной рукой при попытке достичь заданную цель, к минимальному расстоянию от стартовой позиции до достигнутой точки (L/r), или кривизна траектории движения. Чем лучше выполняется движение, тем ближе этот показатель к единице. Результаты оценки кривизны траектории движения руки до и после курса терапии представлены в табл. 4. Показано статистически значимое уменьшение кривизны траектории движения паретичной руки вертикально вверх (достижение цели 1) и по диагонали (достижение цели 2).

Таким образом, после курса реабилитационной терапии с включением тренинга в условиях ВР выявлено статистически значимое уменьшение кривизны траектории движения паретичной руки вертикально вверх (достижение цели 1) и по диагонали (достижение цели 2). Изменение траектории при движении к 3-й цели, расположенной по горизонтальной плоскости, было статистически незначимо. Это можно объяснить тем, что изначально у данной категории пациентов траектория движения по горизонтали была наиболее приближена к норме (L/r 1,05). К тому же во время тренинга в условиях ВР пациентом не совершалось движения паретичной рукой в горизонтальной плоскости.

Анализ скорости выполнения двигательного задания выявил статистически значимое снижение общего времени выполнения задания. Так, до начала лечения этот показатель был равен 14,56 [12,96; 17,62] с, а после курса тренинга — 12,34 [10,26; 16,32] с ($p = 0,014$). Уменьшение времени выполнения двигательного задания может косвенно свидетельствовать об увеличении скорости движения после курса терапии с включением тренинга в условиях ВР. Корреляционный анализ выявил тесную связь между степенью пареза по шкале MAS и такими биомеханическими параметрами, как точность попадания в цель ($r = 0,46$; $p = 0,0023$) и кривизна траектории движения ($r = 0,38$; $p = 0,032$).

Впервые проведенные в России исследования по изучению эффекта применения технологий виртуальной реальности при двигательном обучении пациентов с постинсультным парезом руки показали, что использование этой технологии

особенно эффективно у больных с локализацией очага в правом полушарии. Есть данные, что патология правого полушария головного мозга сопровождается неосознанием и игнорированием больными своего двигательного дефекта и отсутствием интереса к проводимому лечению и его результатам [2, 7]. Видимо, благодаря повышению мотивации, интереса самого пациента к тренировкам в условиях ВР применение данной технологии повышает эффективность реабилитации и при локализации очага в правом полушарии. Таким образом, включение в реабилитационный комплекс курса тренировок с применением технологий ВР особенно важно для пациентов с локализацией очага в правом полушарии.

Выявлено, что применение компьютерных игр в условиях ВР способствует уменьшению степени пареза не только в проксимальных отделах руки, на тренировку которых в основном направлены игровые задания, но также и в кисти. Возможно, такие результаты можно объяснить с позиции нейропластичности мозга [1, 3, 6]. Представительство кисти в коре головного мозга занимает очень большую площадь, поэтому при усиленной афферентации с руки в целом, возникающей во время тренинга, сигналы могут попадать в эти зоны, активизируя их.

Регистрация биомеханических параметров движения показала, что у пациентов с постинсультным парезом руки после курса реабилитации с применением технологий ВР происходит улучшение некоторых биомеханических параметров движения руки: повышается точность попадания в цель, уменьшается кривизна траектории движения, уменьшается время выполнения двигательного задания. Это согласуется с данными, полученными в клинической части исследования об улучшении двигательной функции руки, уменьшении степени пареза как в проксимальной, так и в дистальной части верхней конечности.

Следует также отметить, что среди пациентов, получавших реабилитационный курс с применением технологий ВР, каких-либо побочных эффектов и осложнений терапии (падений и травматизаций во время тренинга, ухудшения координации дви-

Таблица 4

Отношение длины пути движения к минимальному расстоянию от стартовой позиции до достигнутой точки L/r у больных основной группы до и после тренинга с помощью технологии ВР

Направление движения	До лечения	После лечения	<i>p</i>
Вертикально вверх (цель 1)	1,09 [1,04; 1,25]	1,06 [1,02; 1,10]	0,0062
Вверх по диагонали (цель 2)	1,17 [1,04; 1,27]	1,09 [1,04; 1,20]	0,0475
По горизонтальной плоскости в сторону (цель 3)	1,05 [1,02; 1,09]	1,04 [1,01; 1,08]	0,1074

жения, увеличения спастичности, усиления патологической синергии и др.) не наблюдалось, как и в аналогичных исследованиях по изучению эффекта применения технологий ВР для двигательного обучения пациентов с парезом руки [8, 11, 12]. Ни один пациент не прервал курс лечения по собственному желанию.

Таким образом, проведенное исследование показало, что двигательное обучение в условиях ВР является безопасным, доступным и эффективным методом для восстановления движения и может быть рекомендовано для внедрения в комплексную реабилитацию больных, перенесших инсульт, как в условиях стационара, так и в амбулаторных и домашних условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бушенёва С. Н., Кадыков А. С., Черникова Л. А. // *Анналы клин. и эксперим. неврол.* — 2007. — Т. 1, № 2. — С. 4-8.
2. Доброхотова Т. А., Брагина Н. Н. *Функциональная асимметрия и психопатология очаговых поражений мозга.* — М., 1977.
3. Кадыков А. С., Черникова Л. А., Шахпаронова Н. В. *Реабилитация неврологических больных.* — М., 2008.
4. Суслина З. А., Варакин Ю. А. // *Анналы клин. и эксперим. неврол.* — 2007. — Т. 1, № 2. — С. 22-28.
5. Устинова К. И., Черникова Л. А. // *Анналы клин. и эксперим. неврол.* — 2008. — Т. 2, № 4. — С. 34-39.
6. Черникова Л. А. // *Анналы клин. и эксперим. неврол.* — 2007. — Т. 1, № 2. — С. 40-47.
7. Шмельков В. Н. *Восстановление двигательных возможностей у больных с постинсультными параличами и парезами при локализации очага в разных полушариях головного мозга: Дис. ... канд. мед. наук.* — М., 1979.
8. Flynn S., Palma P., Bender A. // *J. Neurol. Phys. Ther.* — 2007. — Vol. 31, N 4 — P. 180-189.
9. Lang C. E., MacDonald J. R., Gnip C. // *J. Neurol. Phys. Ther.* — 2007. — Vol. 31, N 1. — P. 3-10.
10. Mathers C. D., Loncar D. // *PLoS Med.* — 2006. — Vol. 3, N 1. — P. e442.
11. Rand D., Kizony R., Weiss P. T. // *J. Neurol. Phys. Ther.* — 2008. — Vol. 32, N 4. — P. 155-163.
12. Yavuzer G., Senel A., Atay M. B., Stam H. J. // *Eur. J. Phys. Rehabil. Med.* — 2008. — Vol. 44, N 3. — P. 237-244.

Поступила 08.12.10

РЕЗЮМЕ

Ключевые слова: инсульт, реабилитация, технология виртуальной реальности

Впервые в России проведено изучение эффекта двигательного обучения в условиях технологии виртуальной реальности (ВР). С этой целью использовали аппаратуру PlayStation II с видеовводом изображения через цветную цифровую видеокамеру и анимационную компьютерную программу Eye Toy Play-3 (фирма "Sony") для реабилитации 47 пациентов с постинсультным парезом руки в возрасте от 21 года до 76 лет, со средней давностью заболевания около 8 мес. Тренировка проводилась по 20—30 мин 5 раз в неделю, курс состоял из 10 процедур. Эффект обучения оценивался клинически (по шкале Motor Assessment Scale — MAS) и биомеханически с помощью электромагнитной системы Mini Birds ("Ascension Technology Corporation", США). Показано, что использование технологии ВР особенно эффективно у больных с локализацией очага в правом полушарии, оно способствует уменьшению степени пареза не только в проксимальных отделах руки, на тренировку которых в основном направлены игровые задания, но также и в кисти, что можно объяснить с позиции нейропластичности мозга. Кроме того, повышается точность попадания в цель, уменьшается кривизна траектории движения и снижается время, затраченное на выполнение двигательного задания в целом.

THE USE OF THE VIRTUAL REALITY TECHNOLOGY FOR THE RESTORATION OF MOVEMENTS OF THE PARETIC HAND AFTER STROKE

Chernikova L.A., Ioffe M.E., Kurganskaya M.E., Mokienko O.A., Katsuba N.A., Ustinova K.I., Prokopenko R.A., Frolov A.A.

Key words: stroke, rehabilitation, virtual reality technology

We have undertaken for the first time in this country a study of the effect of motor training under conditions of virtual reality (VR) based on the use of the PlayStation II apparatus with the input of video images via a colour digital video camera and the Eye Toy Play-3 computer animation program (Sony) for the medical rehabilitation of 47 patients aged from 21 to 76 years who presented with post-stroke arm/hand paresis. The mean duration of this pathology was roughly 8 months. Each training session lasted 20-30 minutes; a total of 5 seances per week were carried out during 10 days. The effect was evaluated either clinically (based on the motor assessment scale, MAS) or biomechanically with the help of the Mini Birds electromagnetic system (Ascension Technology Corporation, USA). It was shown that the application of the virtual reality technology is especially efficacious in the patients with stroke localization in the right hemisphere. It decreased the severity of paresis not only in the proximal segments of the limb but also in its distal parts (wrist). This effect can be attributed to neuroplasticity. Moreover, the training increased the accuracy of hitting the target, decreased the curvature of the trajectory of motion, and reduced the time needed to fully accomplish the task.