

# Виртуальная реальность в нейрореабилитации

К.И. Устинова<sup>1</sup>, Л.А. Черникова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Центральный Мичиганский университет, США

<sup>2</sup>Научный центр неврологии РАМН, Москва

**Ключевые слова:** нейрореабилитация, виртуальная реальность, двигательный контроль.

## Предпосылки развития виртуальных технологий

**В**иртуальная реальность (VR) — это генерированное с помощью анимационных компьютерных программ и отображаемое на экране окружающее пространство, максимально приближенное к действительному. Очень близкая по своим свойствам к кино и телевидению, VR имеет некоторые отличительные особенности. Ключевым компонентом этой технологии является возможность человека взаимодействовать с виртуальной средой. Погруженный в виртуальное пространство, он может участвовать в виртуальных событиях, например перемещаться, манипулировать с виртуальными предметами и даже наблюдать свои действия со стороны в качестве постороннего зрителя.

VR начала свое развитие в качестве простых компьютерных игр в начале 1990-х годов и быстро зарекомендовала себя как эффективный метод нейрореабилитации. Несмотря на всю, казалось бы, «несерьезность» использования игр в реабилитации больных, данный метод основан на фундаментальных механизмах физиологии движения. Еще в середине XX в. в научных трудах, ставших позже классическими [1, 2], было отмечено, что параметры наших движений, наша двигательная координация целиком и полностью зависят от двигательного задания, которое мы выполняем. Так, например, ходьба человека по ровной поверхности изменяется коренным образом, если он возьмет в руку стакан с водой и пойдет, стараясь не расплескать ее на ходу. В этом случае ходьба замедлится, станет более осторожной, резкие движения исчезнут, что, в свою очередь, обеспечивается гораздо более интенсивной ко-активностью мышц-антагонистов ног и туловища по сравнению с обычной ходьбой. Практический вывод из этого: изменяя двигательное задание, мы можем влиять на отдельные параметры движения или ход его выполнения в целом. Иными словами, мы можем добиваться необходимого двигательного ответа и тем самым тренировать недостающие координационные компоненты у больных с различными двигательными нарушениями.

Эти практические соображения были положены в основу метода физической реабилитации больных, известного как «целенаправленный подход». Оформленный в самостоятельную теорию австралийскими физиотерапевтами Carr and Shepherd (1982), метод предполагал активное переобучение больного двигательным функциям взамен утраченных в результате неврологических нарушений, используя в основном функциональные

движения [4]. В России этот метод является одним из наиболее используемых в нейрореабилитации [3]. Согласно идеям активного переобучения, успешное восстановление функций, максимально приближенных к утраченным, требует соблюдения следующих параметров режима двигательной активности. Во-первых, больному нужно тренироваться в среде, максимально приближенной к реальной. Во-вторых, он должен видеть свои ошибки, чтобы затем иметь возможность скорректировать выполнение двигательного действия. Другими словами, ему необходимо получать объективную информацию о ходе и качестве выполнения задания, т.е. иметь обратную связь. И в-третьих, больной должен быть заинтересован в результате реабилитации и хотеть активного вовлечения в процесс. Используя традиционные методы физиотерапии, например, лечебную гимнастику, не всегда удается следовать всем трем требованиям активного обучения больного двигательным навыкам. В этом отношении VR с ее возможностями моделировать практически любое пространство и предьявлять неограниченную обратную связь с ее высокомотивационными игровыми заданиями способна восполнить недостающие компоненты успешной реабилитационной программы.

## Восстановление движений руки с помощью VR

Наибольший опыт использования VR-технологий накоплен в области восстановления движений руки у пациентов с патологией ЦНС. Типичные функции руки, которые нарушаются у больных с различными заболеваниями мозга, — это способность дотронуться до объекта с максимальной точностью и скоростью, манипулировать им, а также координировать движения двух рук. Причины подобных нарушений могут быть различные, но прежде всего они включают мышечную слабость, изменения мышечного тонуса, координации движений в суставах и последовательности включения различных групп мышц [5, 6, 7]. В силу того, что объем движений в руке иногда недостаточен, чтобы дотянуться до какого-нибудь объекта, больной может компенсировать это за счет дополнительного включения корпуса [25]. Кроме того, пациенты со спастическими парезами в кисти испытывают трудности при дозировании мышечного усилия, например, при сгибании и разгибании пальцев [38].

Несмотря на то, что при восстановлении нарушений двигательных функций руки традиционная физическая реабилитация вряд ли может быть заменена виртуальной терапией, некоторый положительный опыт использования последней уже накоплен. Одной из наиболее доступных



рис. 1: Испытуемый, выполняющий задание согласно виртуальной игре «боулинг» из серии EyeToy Play 3, разработанной корпорацией Sony

технологий являются виртуальные игры серии EyeToy, созданные корпорацией Sony. В середине 1990-х годов Sony предложила видеоигры, использующие недорогие веб-камеры с игровой приставкой PlayStation II. Веб-камера регистрирует изображение, стоящего перед ней человека и затем помещает его в игровой сюжет, происходящий на экране (рис 1). Таким образом, человек становится участником игры, в процессе которой он должен ловить различные предметы, имитировать движения борьбы кунг-фу, боулинга, бокса или баскетбола. Наши недавние исследования показали, что использование игр серии EyeToy Play 3 в течение 40 минут на протяжении 2 недель позволило улучшить координацию, точность и скорость движения у ряда пациентов с болезнью Паркинсона и различными формами спиноцереbellарных атаксий.

Погружение человека в виртуально генерируемое пространство также может достигаться проекцией изображения на жидкокристаллические дисплеи, вмонтированные в специальный шлем или очки, соединенные с компьютером. В этом случае создается ощущение пребывания в реальном объемном мире. В одном из исследований с использованием подобного шлема больные с хроническими постинсультными гемипарезами могли видеть движения своей руки и тренировались попадать указательным пальцем в виртуальную мишень [36]. Виртуальная мишень представляла собой шесть кнопок, расположенных в два ряда и имитирующую панель с кнопками в лифте. По команде человек должен был точно попасть в одну из кнопок, каждая из которых имела свой номер. По окончании курса терапии (30 минут ежеднев-

но на протяжении 10 дней) у больных улучшились точность и объем движений в локтевом суставе. Похожие результаты были получены Piron и коллегами [32]. Используя VR, авторы тренировали людей с постинсультными гемипарезами складывать виртуальные конверты в виртуальный почтовый ящик.

Известно, что неспособность больного выполнить намеченное движение рукой влечет за собой формирование компенсаторных двигательных синергий. Например, будучи не в состоянии согнуть руку в плече в такой степени, чтобы дотянуться до объекта, человек может использовать дополнительное отведение в плече [5]. Чтобы предотвратить формирование устойчивых двигательных компенсаций, мешающих в конечном итоге восстановлению нормального движения, Holden и др. [14] предлагали больному во время выполнения упражнения следовать оптимальной траектории, которая демонстрировалась на экране. Причем, больной имел возможность синхронизировать свои движения как с движущейся конечной траекторией, так и с движением виртуальной руки на экране. Результатом подобной тренировки стало улучшение двигательных функций руки.

Для восстановления способности дозировать мышечное усилие во время удерживания предмета, так же, как и во время разжимания пальцев, реабилитационным институтом Чикаго была предложена комбинация VR и вспомогательных технологий. Подобный двигательный дефицит у больных с постинсультными гемипарезами в основном возникает по причине повышенного тонуса (спастичности) мышц-сгибателей кисти и слабости мышц-разгибателей. «Кибернетическая перчатка» при этом была успешно совмещена с пневматическим ортезом для кисти [26]. Больной, сидящий на стуле и наблюдающий виртуальное пространство через вмонтированный в шлем дисплей, должен был захватить виртуальную баночку из-под кока-колы, переместить ее и затем, разжав пальцы, вернуть руку в исходное положение. Действие ортеза контролировалось ассистентом, который имел возможность наблюдать пациента на компьютерном экране. В случае недостаточной силы сгибания или разгибания в кисти приводимый в движение ортез облегчал работу пальцев. Больного информировали об успешности выполнения задания звуковым сигналом. Данное устройство испытывалось на нескольких пациентах со спастическим гемипарезом. Метод обещает быть полезным для восстановления у больных функций кисти.

### Восстановление позы и равновесия с помощью VR

Как известно, успешное сохранение устойчивости тела во время стояния, ходьбы и любых перемещений требует интеграции информации, поступающей от трех основных сенсорных систем – зрительной, проприоцептивной и вестибулярной [12]. Участие каждой из них в обеспечении позы устойчивости в основном зависит от индивидуальных особенностей человека, специфики выполняемого задания, окружающей среды и может перераспределяться в случае дефицита одного из источников сенсорной информации [16, 22]. Подобная способность нашего мозга перераспределять сенсорную информацию позволяет сохранять устойчивость вертикальной позы в условиях недостаточности функционирования одной из сенсорных систем, что нередко сопровождается заболеваниями ЦНС [15]. Более серьезные нарушения позы

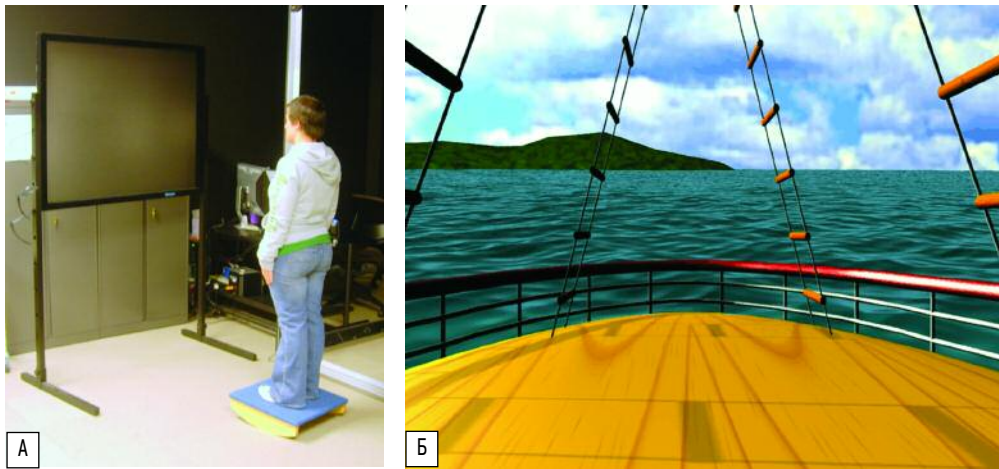


рис. 2: Испытуемый, стоящий на подвижной опоре (А) и наблюдающий движение лодки на экране (Б), ощущает себя стоящим на реальной палубе

устойчивости возникают в случае, когда элементы информации, поступающей из различных сенсорных источников, неточны и противоречат друг другу [24, 29]. Так, например, большие движущиеся объекты, попадающие в поле зрения человека, создают иллюзию собственного движения в противоположном направлении. Подобные иллюзии, в свою очередь, вызывают непроизвольную перестройку позы и тем самым нарушают устойчивость. Как быстро исходное положение тела восстановится, зависит от того, насколько быстро мозг определит, какой из сенсорных источников дает неверную информацию о положении тела в пространстве, и начнет игнорировать ее [18].

У больных с повреждением сенсорных и ассоциативных зон мозга способность исключать зрение и корректировать позную устойчивость, полагаясь на внутренние (проприоцептивные и вестибулярные) сенсорные сигналы, как правило, нарушена [8, 9, 27]. Это бывает связано как с общим сенсорным дефицитом, так и с нарушением способности мозга интерпретировать и интегрировать полученную сенсорную информацию. Как результат, сенсорный конфликт может вызвать у больных потерю равновесия и даже спровоцировать падение со всеми неприятными последствиями.

Было показано, что предъявление человеку виртуально генерированного движущегося пространства является эффективным способом улучшить сенсорную адаптацию, необходимую для сохранения равновесия. Больные с постинсультными гемипарезами тренировались сохранять равновесие, стоя на подвижной платформе-качалке и смотря на экран, на котором проецировалось компьютерное изображение качающейся на воде лодки (рис. 2). Создавалась иллюзия стояния на борту реальной лодки, что нарушало устойчивость. После нескольких повторений способность больного сохранять равновесие, нарушенное поступающей конфликтной зрительной информацией, улучшилось.

Другим серьезным испытанием устойчивости служат произвольные движения, выполняемые в момент поддержания вертикальной позы [10, 34]. Известно, что основное количество падений больных происходит в момент выполнения ими бытовых операций, таких как попытка достать какой-нибудь предмет с верхней полки на кухне, завязывание шнурков обуви, перемещения в ванной комнате и др. Было показано, что использование

виртуальных игр, разработанных группой VIVID IREX, помогает восстанавливать такого рода дефицит у пациентов с постинсультными гемипарезами и повреждениями спинного и головного мозга [20, 37]. Виртуальные игры VIVID IREX являются аналогом игр EyeToy, но более адаптированы к возможностям людей с ограниченными двигательными функциями. С использованием игр IREX пациенты тренировались сохранять равновесие, отбивая виртуальные мячи и ловя виртуальных птиц. Причем больные с грубыми двигательными нарушениями в результате травмы спинного мозга выполняли задание, сидя в инвалидном кресле. У всех участников терапии достоверно улучшились показатели стабильности, отмечалась повышенная мотивация, заинтересованность и желание увеличить количество процедур, что немаловажно для реабилитации.

Потенциально эффективным для восстановления устойчивости вертикальной позы может быть и использование виртуального велотренажера или горнолыжного спуска. В первом случае человек, сидящий на велотренажере, видит велосипедную трассу на дисплее, вмонтированном в шлем, и таким образом ощущает себя едущими по трассе со всеми возможными поворотами и неожиданными изменениями пути. Эта система использовалась в основном для тренировки здоровых испытуемых [19]. Но поскольку велотренажер закреплен в фиксированном положении и обеспечивает надлежащий уровень безопасности, система может быть также использована для улучшения равновесия у больных с различными проявлениями позного дефицита.

### **Восстановление локомоций с помощью ВР**

В последнее время виртуальные технологии все интенсивнее начинают использоваться для восстановления ходьбы. Типичные проявления нарушений ходьбы у больных с неврологическими расстройствами – ее замедление, асимметрия, потеря устойчивости во время перемещений по неровной поверхности и на поворотах, а также задержка с инициацией и остановкой [21, 30].

Как известно, ходьба человека – комплексный сенсомоторный акт, в котором поток оптической информации является основным источником, формирующим наши внутренние представления о направлении и скорости перемещения в пространстве [13]. В случае, когда оптический поток не соответствует проприоцептивной

информации, параметры ходьбы непроизвольно перенастраиваются двигательными центрами мозга [31]. Используя этот механизм, больные с постинсультными гемипарезами тренировались в ходьбе в виртуальном пространстве [23]. Они шагали по бегущей дорожке с произвольной, удобной для них скоростью. На дисплее, смонтированном в шлем, проецировалось изображение коридора, который расширялся, имитируя изменения оптической информации во время ходьбы. Таким образом создавалась иллюзия передвижения по коридору. Последовательное ускорение или замедление движения коридора влекло за собой непроизвольное изменение скорости ходьбы испытуемого. Манипулируя потоком оптической информации на экране дисплея, удавалось влиять (в основном, увеличивать) на скорость передвижения у больных с постинсультными гемипарезами. Этот метод может быть использован для восстановления навыков ходьбы у больных с неврологическими нарушениями.

Похожий метод применялся также для облегчения начала ходьбы у пациентов с болезнью Паркинсона. Как известно, у них возникает проблема с возобновлением движения после остановки, известная в литературе как *freezing* («примораживание», «прилипание») [28, 35]. Трудности с продолжением движения также возникают при прохождении через узкий дверной проем, выполнении поворота или обходе препятствий. Хотя механизм появления подобного дефицита до сих пор не известен, некоторые данные говорят о том, что одной из причин может быть нарушение способности к интеграции сенсорной информации [11]. Не случайно предъявление больному дополнительного визуального стимула в виде, например, нанесенной на дорожку разметки способно облегчить инициацию ходьбы [17]. Принимая это во внимание, были сделаны попытки использовать здесь виртуальный коридор. В частности, оказалось, что большинство больных начинали движение значительно быстрее в движущемся коридоре по сравнению с реальным. Т.е. можно говорить о положительном опыте применения VR при тренировке ходьбы у пациентов с болезнью Паркинсона.

Были получены интересные данные об использовании локомоторного интерфейса *Gait Master 2* для восстановления ходьбы у больных с постинсультными гемипарезами. Данный интерфейс представляет собой две платформы для ног, соединенные на манер обычного степ-тренажера. Приводимые в действие автоматически, они с большой степенью точности воспроизводили траекторию движения стоп во время ходьбы. Движение платформ синхронизировалось через компьютерное устройство с движением виртуального пространства, проецируемого на дисплей, смонтированный в шлем. Таким образом у больного создавалось ощущение ходьбы по пересеченной местности в реальном пространстве. Авторы испытывали эту систему на двух испытуемых с гемипарезом и отмечали значительное улучшение скорости и симметричности ходьбы [40].

### Восстановление комплексных движений с помощью VR

Целью физической реабилитации неврологических больных является не только восстановление отдельных движений, но и бытовых навыков. Одно из новейших применений VR — создание виртуального гастронома на

базе платформы *VIVID IREX* [39]. Как известно, поход в магазин и выполнение бытовых операций, связанных с выбором, покупкой, складыванием купленных (или отобранных) товаров в корзину, сопряжены с некоторыми трудностями и риском падений больных с двигательными нарушениями. Погруженный в реальность виртуального гастронома, пациент мог перемещаться между рядами, заставленными полками с различными товарами, выбирать различные продукты согласно заранее определенному списку, снимать вещи с полок, рассматривать, класть их в корзину или возвращать на место. Выполнение таких бытовых операций преследовало сразу несколько целей. Во-первых, стимулировало восстановление когнитивных функций. Больной должен был сделать выбор, принимать решение, планировать свои действия. Во-вторых, перемещаясь между полками с продуктами и, что немаловажно, доставая продукты с самых дальних полок, он тренировал устойчивость вертикальной позы. Успешность выполнения задания оценивалась по количеству набранных баллов, начисляемых за каждый правильно выбранный продукт. В дополнение также учитывалась скорость выполнения задания. Исследования показали, что использование виртуального магазина в реабилитации больных с постинсультными гемипарезами позволило существенно улучшить выполнение ими бытовых операций [33]. Вдохновленные полученными результатами, создатели виртуального гастронома не остановились на достигнутом и создали также виртуальную прачечную и железнодорожную станцию.

Некоторые бытовые навыки также возможно практиковать больным с использованием набора виртуальных операций, предлагаемых компанией *Ascension* (<http://www.ascension-tech.com/applications/virtual.php>). Примером может служить управление штурвалом самолета, манипуляции с инструментами и многие, многие другие. Хотя на сегодняшний день нет достаточной информации о положительном опыте использования этих игр в нейрореабилитации, применение их обещает быть успешным.

Как уже отмечалось выше, координация больными движений руки и позы, являющаяся основой многих бытовых навыков, нарушается при различных неврологических патологиях и у пожилых людей. Для больных с постинсультными гемипарезами было создано изображение виртуальной клумбы в форме полукруга с цветами, расположенными в несколько рядов (рис. 3). Изображение клумбы проецировалось на экран. Моделировались движения тела испытуемого, стоящего перед экраном, и модель помещалась внутрь клумбы. Таким образом, пациент имел возможность наблюдать свои

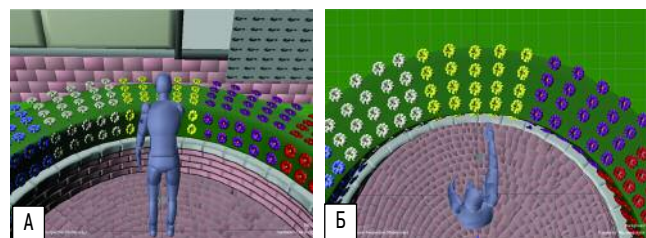


рис. 3. Виртуальная клумба с моделью тела испытуемого, пытающегося дотянуться до максимально удаленного цветка. Изображение предъявляется испытуемому под различными углами зрения: передний вид (А), вид сверху (Б)

действия в качестве третьего лица. Он должен был дотянуться до максимально удаленного цветка в переднем, боковом и диагональном направлениях без потери равновесия. Причем изображение на экране каждый раз демонстрировалось ему под различными углами зрения, от переднего вида до вида сверху. Повторение движений в виртуальном пространстве влекло за собой улучшение реальной координации руки и позы. Более того, в процессе исследования было выявлено, что возможность наблюдать свои собственные движения сверху помогала больным увеличить их амплитуду без потери равновесия. Данный результат иллюстрирует, что манипуляции с сенсорным восприятием своего тела в пространстве с помощью ВР позволяют улучшить двигательные возможности больного.

### Сравнение с традиционной лечебной гимнастикой

ВР, как и любой другой высокотехнологичный метод, имеет свои преимущества и недостатки по сравнению с традиционными методами физической реабилитации. К очевидным недостаткам относится все еще высокая стоимость оборудования. Поскольку наиболее привлекательной стороной данной технологии является погружение больного в виртуальное пространство, то ощущение реального присутствия в нем исключительно важно. Достижение ощущения полного погружения в виртуальную среду требует наличия дорогостоящего оборудования, воспроизводящего виртуальные сценарии, системы для анализа движений и технологий, интегрирующих двигательные, зрительные, а также проприоцептивные сигналы. Удешевление процесса возможно за счет использования недорогих и качественных игровых приставок, выпускаемых в большом количестве фирмами —

производителями компьютерных игр. Однако недостатком таких игр является невозможность адаптации их к условиям применения в клинике нервных болезней. Реабилитологи, использующие их, отмечали трудности с настройкой уровня сложности игрового задания в соответствии с двигательными возможностями больного. Пациенты, которые оказались не в состоянии выполнить даже простейшие двигательные требования, очень быстро теряли интерес к игре, разочаровывались и не хотели продолжать данную терапию. Также у некоторых из них было отмечено формирование патологических компенсаторных двигательных и позных синергий.

Несмотря на некоторые ограничения, ВР имеет и ряд неоспоримых достоинств [39]. Практически любое движение может быть имитировано в виртуальном пространстве без особенного риска для больного получить травму. Так, тренируя, например, устойчивость, пациенты ощущали себя участниками событий, в которых в реальной жизни они вряд ли смогли бы участвовать (например, они становились успешными горнолыжниками, игроками в теннис, футбол и т.д.). Большинство, вовлеченных в терапию отмечали высокую заинтересованность, занятия проходили на эмоциональном подъеме, который, в свою очередь, служил дополнительным стимулом для тренировки двигательных функций.

Необходимо подчеркнуть, что все вышесказанное совершенно не означает, что ВР заменит традиционные методы реабилитации. Конечно же, это не так. Но ВР в скором будущем сможет занять важное место и органически дополнить традиционные методы восстановительного лечения.

### Список литературы

1. Анохин П.К. Единство центра и периферии в нервной деятельности. Физиол. журн. СССР 1935; 19: 21–28.
2. Бернштейн Н.А. Очерки по физиологии движения и физиологии активности. М.: Медицина, 1966.
3. Столярова Л.Г., Ткачева Г.Р. Реабилитация больных с постинсультными двигательными расстройствами. М.: Медгиз, 1978.
4. Carr J.H., Shepherd R.B. A motor relearning programme for stroke. Rockville: Aspen Publishers, 2nd ed., 1987.
5. Cirstea M.C., Levin M.F. Compensatory strategies for reaching in stroke. Brain 2000; 123: 940–953.
6. Bourbonnais D., Vanden Noven S. Weakness in patients with hemiparesis. Am. J. Occup. Ther. 1989; 43: 313–319.
7. Bourbonnais D., Vanden Noven S., Pelletier R. Incoordination in patients with hemiparesis. Can. J. Public Health 1992; 83 (Suppl. 2): S58–S63.
8. Bronstein A.M. Visual vertigo syndrome: clinical and posturography findings. J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry 1995; 59: 472–476.
9. Di Fabio R.P., Badke M.B. Stance duration under sensory conflict conditions in patients with hemiplegia. Arch. Phys. Med. Rehabil. 1991; 72: 292–295.
10. Garland S.J., Willems D.A., Ivanova T.D. et al. Recovery of standing balance and functional mobility after stroke. Arch. Phys. Med. Rehabil. 2003; 84: 1753–1759.
11. Georgiou N., Ianssek R., Bradshaw J.L. et al. An evaluation of the role of internal cues in the pathogenesis of parkinsonian hypokinesia. Brain 1993; 116: 1575–1578.
12. Gurfinkel V.S., Levik Yu.S. Sensory complexes and sensorimotor integration. Hum. Physiol. 1979; 5: 269–281.
13. Harris J.M., Bonas W. Optic flow and scene structure do not always contribute to the control of human walking. Vision Res. 2002; 42: 1619–1626.
14. Holden M.K., Dyar T.A., Dayan-Cimadoro L. Telerehabilitation using a virtual environment improves upper extremity function in patients with stroke. IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng. 2007; 15: 36–42.
15. Horak F.B., Nashner L.M., Diener H.C. Postural strategies associated with somatosensory and vestibular loss. Exp. Brain Res. 1990; 82: 167–177.
16. Jeka J.J., Lackner J.R. Fingertip contact influences human postural control. Exp. Brain Res. 1994; 100: 495–502.
17. Jiang Y., Norman K.E. Effects of visual and auditory cues on gait initiation in people with Parkinson's disease. Clin. Rehabil. 2006; 20: 36–45.
18. Keshner E.A., Kenyon R.V. Using immersive technology for postural research and rehabilitation. Asst. Technol. 2004; 16: 27–35.
19. Kim N.G., Yoo C.K., Im J.J. A new rehabilitation training system for postural balance control using virtual reality technology. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering 1999; 7: 482–485.

20. Kizony R., Raz L., Katz N. *et al.* Video-capture virtual reality system for patients with paraplegic spinal cord injury. *J. Rehabil. Res. Dev.* 2005; 42: 595–608.
21. Knutsson E., Richards C. Different types of disturbed motor control in gait of hemiparetic patients. *Brain* 1979; 102: 405–430.
22. Kuo A.D., Speers R.A., Peterka R.J. *et al.* Effect of altered sensory conditions on multivariate descriptors of human postural sway. *Exp. Brain Res.* 1998; 122: 185–195.
23. Lamontagne A., Fung J., McFadyen B.J. *et al.* Modulation of walking speed by changing optic flow in persons with stroke. *J. Neuroengineering Rehabil.* 2007; 4: 22.
24. Lestienne F., Soechting J., Berthoz A. Postural readjustments induced by linear motion of visual scenes. *Exp. Brain Res.* 1977; 28 (3-4): 363–384.
25. Levin M.F., Michaelsen S.M., Cirstea C.M. *et al.* Use of the trunk for reaching targets placed within and beyond the reach in adult hemiparesis. *Exp. Brain Res.* 2002; 143: 171–180.
26. Luo X., Kline T., Fischer H. *et al.* Integration of augmented reality and assistive devices for post-stroke hand opening rehabilitation. *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* 2005; 7: 6855–6858.
27. Marigold D.S., Eng J.J., Tokuno C.D. *et al.* Contribution of muscle strength and integration of afferent input to postural instability in persons with stroke. *Neurorehabil. Neural Repair* 2004; 18: 222–229.
28. Marsden C.D. Neurophysiology. In: Stern G.N. (ed.) *Parkinson's disease*. London: Chapman & Hall, 1990.
29. Mergner T., Schweigart G., Maurer C. *et al.* Human postural responses to motion of real and virtual visual environments under different support base conditions. *Exp. Brain Res.* 2005; 167: 535–556.
30. Olney S.J., Griffin M.P., McBride I.D. Temporal, kinematic, and kinetic variables related to gait speed in subjects with hemiplegia: a regression approach. *Phys. Ther.* 1994; 74: 872–885.
31. Pailhous J., Ferrandez A.M., Fluckiger M. *et al.* Unintentional modulations of human gait by optical flow. *Behav. Brain Res.* 1990; 38: 275–281.
32. Piron L., Cenni F., Tonin P. *et al.* Virtual Reality as an assessment tool for arm motor deficits after brain lesions. *Stud. Health Technol. Inform.* 2001; 81: 386–392.
33. Rand D., Katz N., Weiss P.L. Evaluation of virtual shopping in the VMall: Comparison of post-stroke participants to healthy control groups. *Disabil. Rehabil.* 2007; 13: 1–10.
34. Slijper H., Latash M.L., Rao N. *et al.* Task-specific modulation of anticipatory postural adjustments in individuals with hemiparesis. *Clin. Neurophysiol.* 2002; 113: 642–655.
35. Stelmach G., Phillips J.G. *Motor control in Parkinson's disease*. N.Y.: Churchill Livingstone, 1992.
36. Subramanian S., Knaut L.A., Beaudoin C. *et al.* Virtual reality environments for post-stroke arm rehabilitation. *J. Neuroengineering Rehabil.* 2007; 4: 20.
37. Thornton M., Marshall S., McComas J. *et al.* Benefits of activity and virtual reality based balance exercise programmes for adults with traumatic brain injury: perceptions of participants and their caregivers. *Brain Inj.* 2005; 19: 989–1000.
38. Trombly C.A., Thayer-Nason L., Bliss G. *et al.* The effectiveness of therapy in improving finger extension in stroke patients. *Am. J. Occup. Ther.* 1986; 40: 612–617.
39. Weiss P.L., Rand D., Katz N. *et al.* Video capture virtual reality as a flexible and effective rehabilitation tool. *J. Neuroengineering Rehabil.* 2004; 1: 12.
40. Yano H., Kasai K., Saitou H. *et al.* Development of a gait rehabilitation system using a locomotion interface. *J. Visual. Comput. Anim.* 2003; 14: 243–252.

## Virtual reality in neurorehabilitation

K.I. Ustinova<sup>1</sup>, L.A. Chernikova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Central Michigan University, USA

<sup>2</sup>Research Center of Neurology, Russian Academy of Medical Sciences, Moscow

**Key words:** neurorehabilitation, virtual reality, motor control.