

ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННАЯ РЕАБИЛИТАЦИОННАЯ ОЦЕНКА ЛОКОМОТОРНЫХ ФУНКЦИЙ ПРИ БОЛЕЗНИ ПАРКИНСОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХМЕРНОГО ВИДЕОАНАЛИЗА ДВИЖЕНИЙ

Прокопенко С.В.^{1,2}, Можейко Е.Ю.^{1,2}, Аброськина М.В.^{1,2}, Ондар В.С.^{1,2}, Исмаилова С.Б.^{1,2}, Субочева С.А.¹,
Хомченкова А.А.¹, Гуревич В.А.¹, Зубрицкая Е.М.¹, Малков А.Б.², Кондратьев С.Н.²

¹ФГБОУ ВО «Красноярский государственный медицинский университет им. проф. В.Ф. Войно-Ясенецкого»
Минздрава России, 660022, Красноярск, Россия

²ФГБУ «Федеральный Сибирский научно-клинический центр Федерального медико-биологического агентства
России», 660037, Красноярск, Россия

Резюме. Болезнь Паркинсона (БП) является одним из распространенных нейродегенеративных заболеваний, основным клиническим проявлением которого являются расстройства движений. С учетом медленно прогрессирующего течения заболевания и сложного симптомокомплекса, формирующего впоследствии характерный двигательный паттерн, изучение инновационных объективных методов диагностики и реабилитации двигательных нарушений при БП является актуальным и востребованным. В данной статье приведен пример персонализированной реабилитационной оценки биомеханических проявлений функции ходьбы пациентки с уточненным диагнозом БП 3,5 стадии по Хен и Яру, имеющей постуральные нарушения и нарушения ходьбы, методом трехмерного видеоанализа движений (ВАД) на программно-аппаратном комплексе Vicon Motion Capture Systems. Метод ВАД применялся после прохождения курса реабилитации, основанного на активизации отрыва стопы от поверхности опоры («заднего толчка»). На основании проведенного обследования были выявлены изменения темпо-ритмовых параметров ходьбы пациента с БП в сравнении со здоровым человеком: ускорение темпа ходьбы при укорочении длины одиночного и двойного шага, уменьшение времени двойной опоры, ускорение момента отрыва ноги и снижение скорости ходьбы. При анализе угловых характеристик шага также было выявлено снижение амплитуды сгибания-разгибания в тазобедренном, коленном и голеностопном суставах с наибольшим проявлением на стороне с клинически более выраженным паркинсонизмом, недостаточное сгибание колена и разгибание бедра, избыточное дорсальное сгибание стопы при недостаточном плантарном сгибании. Выявление последних особенностей локомоции в конкретном случае позволяет сформировать план целенаправленной персонализированной реабилитационной программы для данной пациентки. Таким образом, метод трехмерного видеоанализа движений является ценным диагностическим инструментом, позволяющим объективно оценить имеющиеся нарушения локомоции и выявить мишени реабилитационного воздействия.

Ключевые слова: видеоанализ движений; болезнь Паркинсона; ходьба; постуральные нарушения; реабилитация.

Для цитирования: Прокопенко С.В., Можейко Е.Ю., Аброськина М.В., Ондар В.С., Исмаилова С.Б., Субочева С.А., Хомченкова А.А., Гуревич В.А., Зубрицкая Е.М., Малков А.Б., Кондратьев С.Н. Персонализированная реабилитационная оценка локомоторных функций при болезни Паркинсона с использованием трехмерного видеоанализа движений. *Российский неврологический журнал*. 2021;26(1):23–33. DOI 10.30629/2658-7947-2021-26-1-23-33

Для корреспонденции: Можейко Е. Ю., e-mail: el_mozheiko@mail.ru

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, правительства Красноярского края, Краевого фонда науки и АО «Научно-производственного предприятия «Радиосвязь» в рамках научного проекта № 20-415-242902.

Информация об авторах

Прокопенко С.В., <https://orcid.org/0000-0002-4778-2586>

Можейко Е.Ю., <https://orcid.org/0000-0002-9412-1529>

Аброськина М.В., <https://orcid.org/0000-0002-1454-1807>

Ондар В.С., <https://orcid.org/0000-0003-2194-8557>

Исмаилова С.Б., <https://orcid.org/0000-0002-9890-9874>

Субочева С.А., <http://orcid.org/0000-0001-9916-6235>

Хомченкова А.А., <https://orcid.org/0000-0001-9458-1608>

Гуревич В.А., <https://orcid.org/0000-0002-1565-1020>

Зубрицкая Е.М., <https://orcid.org/0000-0001-7407-8837>

Малков А.Б., <https://orcid.org/0000-0003-2282-7407>

Кондратьев С.Н., <https://orcid.org/0000-0003-1909-7829>

PERSONALIZED REHABILITATION ASSESSMENT OF LOCOMOTOR FUNCTIONS IN PARKINSON DISEASE USING THREE-DIMENSIONAL VIDEO ANALYSIS OF MOTIONS

Prokopenko S.V.^{1,2}, Mozheiko E.Yu.^{1,2}, Abroskina M.V.^{1,2}, Ondar V.S.^{1,2}, Ismailova S.B.^{1,2}, Subocheva S.A.¹,
Khomchenkova A.A.¹, Gurevich V.A.¹, Zubritskaya E.M.¹, Malkov A.B.², Kondratyev S.N.²

¹Krasnoyarsk State Medical University named after Voino-Yasenetsky V.F., 660022, Krasnoyarsk, Russia

²FSBI FSRCC FMBA Russia, 660037, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. *Parkinson disease (PD) is one of the most common neurodegenerative diseases. Its main clinical manifestation is movement disorders. The study of innovative objective methods for the diagnosis and rehabilitation of movement disorders in PD is relevant and in demand taking into account the slowly progressive course of the disease and the complex set of symptoms that subsequently forms a characteristic movement pattern. This article provides an example of a personalized rehabilitation assessment of biomechanical manifestations of the gait function of a patient with exacted diagnosis, stage 3.5 PD according to Hoehn and Yahr, by means of the method of three-dimensional motion video analysis using the Vicon Motion Capture Systems soft-hardware complex. The patient has postural and gait disorders. This method was applied after a rehabilitation course based on the activation of lifting the foot from the support surface ("back push"). Changes in the tempo and rhythm parameters of gait in a patient with PD in comparison to a healthy person were revealed: acceleration of walking pace with shortening of the length of single and double step, a decrease in the time of limb advancement, acceleration of the moment of heel rise and a decrease in walking pace. Analysis of the locomotion also revealed a decrease in the amplitude of flexion-extension in the coxofemoral joint, knee joint and tibio-tarsic on the side with more pronounced Parkinsonism. Insufficient knee flexion and hip extension, excessive dorsal flexion of the foot with insufficient plantar flexion were noted. Revealing the last features of locomotion in a particular case allows one to make a plan for a targeted personalized rehabilitation program for a given patient. Thus, the method of three-dimensional video analysis is a valuable diagnostic tool that makes it possible to objectively assess the existing violations of locomotion and identify the targets of rehabilitation.*

Key words: video analysis of motion; Parkinson disease; gait; postural disorders; rehabilitation.

For citation: Prokopenko S.V., Mozheiko E.Yu., Abroskina M.V., Ondar V.S., Ismailova S.B., Subocheva S.A., Khomchenkova A.A., Gurevich V.A., Zubritskaya E.M., Malkov A.B., Kondratyev S.N. Personalized rehabilitation assessment of locomotor functions in Parkinson disease using three-dimensional video analysis of motions. *Russian Neurological Journal (Rossijskij Nevrologicheskij Zhurnal)*. 2021;26(1):23–33. (Russian). DOI 10.30629/2658-7947-2021-26-1-23-33

For correspondence: Mozheiko E.Yu., e-mail: el_mozheiko@mail.ru

Conflict of interest. The author declares no conflict of interest.

Acknowledgements. The research was carried out with the financial support of the RFBR, the Government of the Krasnoyarsk Territory, the Regional Science Foundation and JSC "Research and Production Enterprise "Radiosvyaz" in the framework of scientific project No. 20-415-242902

Information about authors

Prokopenko S.V., <https://orcid.org/0000-0002-4778-2586>

Mozheiko E.Yu., <https://orcid.org/0000-0002-9412-1529>

Abroskina M.V., <https://orcid.org/0000-0002-1454-1807>

Ondar V.S., <https://orcid.org/0000-0003-2194-8557>

Ismailova S.B., <https://orcid.org/0000-0002-9890-9874>

Subocheva S.A., <https://orcid.org/0000-0001-9916-6235>

Khomchenkova A.A., <https://orcid.org/0000-0001-9458-1608>

Gurevich V.A., <https://orcid.org/0000-0002-1565-1020>

Zubritskaya E.M., <https://orcid.org/0000-0001-7407-8837>

Malkov A.B., <https://orcid.org/0000-0003-2282-7407>

Kondratyev S.N., <https://orcid.org/0000-0003-1909-7829>

Received 07.09.2020

Accepted 24.11.2020

Болезнь Паркинсона (БП) — медленно прогрессирующее нейродегенеративное заболевание с накоплением альфа-синуклеина и формированием интранейрональных телец Леви, проявляющееся своеобразным паттерном двигательных нарушений, вызванных преимущественным поражением дофаминергических нейронов черной субстанции, а также широким спектром немоторных расстройств, включающим вегетативные, когнитивные, аффективные, сенсорные и другие нарушения [1]. Распространенность БП колеблется от 100 до 200 случаев на 100 000 населения, достигая 1% среди лиц старше 60 лет и 3–4% — среди лиц старше 80 лет.

Основными клиническими проявлениями БП являются гипокинезия, ригидность мышц, тремор покоя, постуральные нарушения. Под гипокинезией понимают замедленность движений (брадикинезия), уменьшение их амплитуды, количества и степени

разнообразия двигательных актов (олигокинезия). Для БП типичен тремор покоя, главной характеристикой которого является устранение или ослабление с началом движения. Мышечная ригидность преобладает в дистальной группе мышц и лучше выявляется при сгибании-разгибании в лучезапястном и голеностопном суставах. Ригидность усиливается при повторяющихся движениях, а также при движении в других конечностях.

Постуральные нарушения развиваются, как правило, по мере прогрессирования заболевания, отсутствуя на ранних стадиях, особенно у молодых пациентов, и характеризуются изменением мышечного тонуса и формированием патологической позы [2]. Изменение позы связано с преобладанием тонуса в програвитационной (сгибательной) мускулатуре, что приводит к «позе просителя», характеризующейся наклоном головы и туловища вперед, сгибанием

в коленных и тазобедренных суставах, приведением рук и бедер. Выделяют камптокормию — синдром «согнутой спины», антеколлис — синдром «свисающей головы», синдром «пизанской башни» — латеральный наклон туловища. В свою очередь, нарушения позы при длительном течении заболевания влекут за собой развитие спинальных деформаций — стойких патологических изменений формы и оси позвоночника с наличием искривления в одном и более его отделах [3, 4]. Спинальные деформации могут возникать во всех плоскостях: сагиттальной, фронтальной и аксиальной. Так называемая согбенная поза, или синдром «согнутой спины» — постуральное нарушение, являющееся отличительным признаком БП и наблюдающееся на определенном этапе у всех пациентов, в среднем через 7–8 лет после дебюта заболевания [5]. По данным разных исследований, при прогрессировании заболевания у 3–17% пациентов развивается камптокормия — более тяжелый вариант расстройства позы в сагиттальной плоскости [6–8], при этом термин «камптокормия» является валидным при угле наклона в груднопоясничном отделе позвоночника 45 градусов и более [4, 7, 8].

Нарушения ходьбы типичны для БП и наблюдаются, начиная с ранней стадии заболевания. Поначалу они бывают представлены замедлением и уменьшением длины шага (микробазия), отсутствием содружественных движений рук при ходьбе (ахейрокинез), шарканьем. Характерна асимметрия ходьбы, соответствующая асимметрии симптомов паркинсонизма в конечностях. Причиной нарушения ходьбы, начиная с ранней стадии, может быть и дистония стопы, особенно часто развивающаяся при дебюте БП в молодые годы. На более поздней стадии заболевания в связи с нарастанием постуральных нарушений туловище при ходьбе наклоняется вперед, и, чтобы сохранить равновесие, больные, пытаясь «догнать» центр тяжести своего тела, вынуждены постепенно ускоряться (пропульсия) [1, 9].

Хотя классические симптомы БП не включают парезов, в литературе имеются указания на снижение мышечной силы у больных БП, которые могут включать как собственно снижение силы, так и сниженную скорость нарастания усилия, невозможность поддерживать постоянное усилие и избыточную коактивацию мышц в заданиях на поддержание равновесия [10]. Снижение физической выносливости и развитие мышечной слабости у больных БП с течением заболевания вносят свой вклад в скоростные показатели ходьбы и устойчивости, приводя к высоким рискам падений. По результатам исследований силовые физические упражнения позволили увеличить мышечную силу и выносливость и улучшить показатели ходьбы и устойчивости, что позволило рекомендовать их применение [11].

Таким образом, основные биомеханические проявления БП включают гипокинезию, брадикинезию, ригидность, на поздних стадиях — постуральную неустойчивость и постуральные деформации, а также, начиная с ранних стадий, характерные изменения ходьбы. Развитие технологий восстановитель-

ного лечения больных с последствиями заболеваний и травм нервной системы и опорно-двигательного аппарата требует знания механизмов организации локомоций в норме и патологии, детального анализа структуры двигательных нарушений и их количественной оценки.

Инструментальная оценка биомеханических параметров ходьбы при БП изучена в ряде исследований. Большую диагностическую ценность в анализе локомоций пациента с БП может иметь исследование ходьбы методом видеоанализа движений.

Метод видеоанализа (видеозахвата) движений (ВАД) основан на технологии компьютерного анализа видеоизображений движений обследуемого, при этом видеозахват осуществляется бесконтактно, без использования кабельной связи регистрирующего устройства с объектом исследования [12–15]. Видеоанализ был впервые разработан в исследованиях по биомеханике, но в последнее время широко применяется в медицине, биомеханике и компьютерных играх.

Существует два типа систем видеозахвата — маркерные (с использованием маркеров, или датчиков, которые прикрепляются к телу обследуемого) и безмаркерные, основанные на технологиях компьютерного зрения и распознавания образов [16]. Существуют маркеры активные (передают информацию о своем состоянии, обеспечивают простоту и точность обработки информации, но зачастую имеют большой размер и поэтому могут затруднять само движение объекта) и пассивные (маркеры-отражатели) [17]. Безмаркерные технологии видеоанализа основаны на анализе взаимного расположения неоднородных частей изображений объекта на последовательных кадрах и требуют более сложных вычислений [18, 19].

В клинической практике в настоящее время наиболее широко распространены технологии видеозахвата с использованием пассивных маркеров. К телу обследуемого прикрепляют световозвращающие датчики, сигналы от которых регистрируются видеокамерами; данные передаются в компьютер, где на основании конкретной компьютерной модели проводится обработка информации и формируется отчет, позволяющий проанализировать наглядно представленные угловые и линейные кинематические характеристики изучаемых движений [19, 20]. Получение объективной и полезной информации зависит от количества видеокамер, конструкции, числа и расположения маркеров, построения отвечающей задачам исследования модели и выбора программного пакета аналитической обработки данных [21].

Число маркеров, устанавливаемых на сегменты тела, зависит от задачи исследования: в пределах видимости как минимум двух камер всегда должно быть не менее трех маркеров (так как плоскость определяется в пространстве тремя точками), в реальных условиях для учета изменения положения сегмента тела во время движения и перекрытия зон перемещения различных сегментов обычно используется значительно большее число маркеров [22].

В современных системах видеоанализа обычно реализована возможность построения любых двух- и трехмерных многозвенных моделей исследования, позволяющих отображать интересующие исследователя сегменты локомоторного аппарата [23, 24]. Для «привязки» индивидуальных размеров регистрируемых сегментов тела к компьютерной модели перед началом исследования проводят калибровку обследуемого. Для этого на нем размещают калибровочные маркеры, которые необходимы для определения физических размеров исследуемых сегментов. Стандарты регламентируют терминологию, костные ориентиры для определения границ сегментов тела, виды движений и их систему координат (оси). В настоящее время такие стандарты разработаны для движений стопы, голени, бедра, таза, позвоночника, кисти, предплечья, плеча [11].

В современной литературе накоплены результаты оценки параметров ходьбы в норме, у пожилых, а также при различных заболеваниях.

При БП кинематический анализ ходьбы с использованием результатов ВАД показал изменение структуры цикла шага, связанное с увеличением длительности периода двойной опоры, которая негативно коррелирует со скоростью ходьбы и длиной шага («Траст-М» Биомеханика). С.А. Лихачев с соавт., обследовав 113 пациентов с БП [25], провели сравнительный анализ показателей целенаправленных движений, показателей нецеленаправленных движений и коэффициентов полезности движений, полученных при видеозахвате функционально усложненного шагового движения. Результаты их исследования продемонстрировали глобальное искажение моторной программы при БП и позволили выделить критерии объективизации поражения базальных ганглиев при этом заболевании. Эти же авторы исследовали видеоаналитический профиль 34 пациентов с нарушениями координации (рассеянный склероз, спиноцеребеллярная дегенерация) и убедительно продемонстрировали, что оценка координаторных нарушений по визуальным признакам видеоаналитического профиля может являться адекватным дополнением к диагностике заболеваний нервной системы [26].

Так, Е.В. Грачева с соавт. исследовали клинические и биомеханические показатели ходьбы в динамике у пациентов на различных стадиях БП. Проведя обследование у 171 пациента с БП, с помощью клинических шкал и диагностического комплекса для биомеханической оценки параметров ходьбы «DIERS PEDOGAIT» при разделении пациентов на группы по стадиям БП получили статистически значимые различия по показателям: угол ротации стопы, снижение длины двойного шага, скорость шага, удвоенное время шага и ритм шага. При длительности заболевания в группах до 2 лет и от 2 до 5 лет различия обнаружены в параметрах: время единичного шага и длина шага. При длительности болезни от 5 до 10 лет выявлены значимые различия показателей по шкале Тинетти (TBT). Также в данной группе статистически значимыми по данным биоме-

ханического исследования оказались длина двойного шага, ширина шага, скорость, длительность фазы пресвинга, время единичного шага [27].

Особенностями нарушения ходьбы при дисциркуляторной энцефалопатии по сравнению с больными БП являются более низкие скорость ходьбы и длина шага, более широкая площадь опоры, отсутствие флексорной позы с сохранением содружественных движений рук, более выраженное ограничение способности к произвольному увеличению скорости ходьбы и наличие признаков нарушения праксиса ходьбы, а по данным подометрии и гониометрии — более значительное увеличение длительности периода двойной опоры и уменьшение амплитуды движений в тазобедренных и голеностопных суставах [28, 29].

Гурским И.С. и соавт. исследовались нарушения произвольного постурального контроля и возможностей их реабилитации у пациентов с БП с использованием методик видеоанализа движений и биологической обратной связи. Диагностика статокINETических нарушений методом видеоанализа движений и биологической обратной связи выполнена в группе пациентов с БП (87 пациентов). В ходе проводимых реабилитационных мероприятий, включая тренировки с биологической обратной связью, выявляется статистически значимый рост показателей произвольного постурального контроля (парный тест Wilcoxon, асимметричная альтернативная гипотеза, $p < 0.05$) [27].

Таким образом, трехмерный ВАД является ценным диагностическим инструментом, позволяющим получить объективную информацию о состоянии статолокомоторной системы, что в случае БП является важным аспектом планирования и оценки динамики лечения и возможных реабилитационных вмешательств. Принцип персонализированной оценки локомоторных функций методом ВАД представлен в клиническом наблюдении ниже.

Клиническое наблюдение

Пациентка С., 61 год, наблюдается в кабинете экстрапирамидной патологии по поводу БП. Жалобы при обращении: грубое усиление тремора рук, подбородка; нарастание замедленности и скованности движений, больше слева, изменения ходьбы — уменьшение длины шага, руки подтягиваются к туловищу, а также слабость, нарушение глотания. В течение 6 лет наблюдается в кабинете экстрапирамидной патологии. На основании осмотра диагностирована БП 3,5 ст. по Хен и Яру, преимущественно смешанная (акинетико-ригидно-дрожательная) форма, умеренно-прогредиентное течение с наличием аксиальной ригидности, постуральной неустойчивости в виде пропульсий, с феноменом «ночных проблем»; доброкачественного галлюциноза в анамнезе. В связи с плохой переносимостью препаратов до середины 2019 г. проводилась монотерапия ропиниролом в дозе 12 мг/сут. Состояние с ухудшением к текущему осмотру: выросла амплитуда тремора покоя рук, появился тремор подбородка, усилились скованность и замедленность, сниженное настрое-

Таблица 1

Темпо-ритмовые параметры ходьбы пациента с БП в сравнении со здоровым человеком

Показатели ВАД		Пациент с БП			Здоровый пожилой человек		
		левая нога	правая нога	обе ноги	левая нога	правая нога	обе ноги
1	Темп ходьбы (шаг/мин)	114 ± 3,22	120 ± 5,05	117 ± 5,12	101 ± 3,25	105 ± 3,46	103 ± 3,88
2	Момент отрыва ноги (% в фазе двойного шага)	60,4 ± 1,79	61,7 ± 6,19	61,0 ± 4,65	62,5 ± 2,32	63,0 ± 1,76	62,7 ± 2,07
3	Момент контакта противоположной ноги (% в фазе двойного шага)	50,2 ± 1,13	51,1 ± 7,65	50,7 ± 5,55	51,0 ± 1,21	50,6 ± 1,14	50,8 ± 1,18
4	Момент отрыва противоположной ноги (% в фазе двойного шага)	10,1 ± 1,41	11,0 ± 2,19	10,6 ± 1,89	11,5 ± 0,94	12,2 ± 0,85	11,9 ± 0,96
5	Время одиночной опоры (с)	0,43 ± 0,020	0,41 ± 0,066	0,42 ± 0,051	0,46 ± 0,026	0,44 ± 0,020	0,45 ± 0,025
6	Время двойной опоры (с)	0,21 ± 0,023	0,22 ± 0,019	0,22 ± 0,021	0,27 ± 0,023	0,28 ± 0,018	0,28 ± 0,021
7	Время шага (с)	0,53 ± 0,019	0,49 ± 0,078	0,51 ± 0,060	0,59 ± 0,027	0,57 ± 0,028	0,58 ± 0,028
8	Время двойного шага (с)	1,06 ± 0,031	1,01 ± 0,038	1,03 ± 0,042	1,20 ± 0,044	1,15 ± 0,040	1,17 ± 0,048
9	Длина шага (м)	0,46 ± 0,060	0,44 ± 0,039	0,45 ± 0,051	0,59 ± 0,033	0,58 ± 0,016	0,58 ± 0,027
10	Ширина шага (м)	0,17 ± 0,0100	0,17 ± 0,0048	0,17 ± 0,0080	0,17 ± 0,014	0,17 ± 0,0071	0,17 ± 0,011
11	Длина двойного шага (м)	0,92 ± 0,061	0,88 ± 0,051	0,90 ± 0,059	1,18 ± 0,028	1,16 ± 0,025	1,17 ± 0,028
12	Скорость ходьбы (м/с)	0,87 ± 0,075	0,87 ± 0,040	0,87 ± 0,059	1,00 ± 0,052	1,01 ± 0,041	1,01 ± 0,047

Table 1

The tempo and rhythm parameters of gait in a patient with PD in comparison to a healthy person

Video analysis indices		Patients with PD			Healthy elderly person		
		Left foot	Right foot	Both feet	Left foot	Right foot	Both feet
1	Tempo (step/min)	114 ± 3.22	120 ± 5.05	117 ± 5.12	101 ± 3.25	105 ± 3.46	103 ± 3.88
2	The moment of initial contact (% in swing phase)	60.4 ± 1.79	61.7 ± 6.19	61.0 ± 4.65	62.5 ± 2.32	63.0 ± 1.76	62.7 ± 2.07
3	The moment of the opposite toe off (% in swing phase)	50.2 ± 1.13	51.1 ± 7.65	50.7 ± 5.55	51.0 ± 1.21	50.6 ± 1.14	50.8 ± 1.18
4	The moment of opposite initial contact (% in swing phase)	10.1 ± 1.41	11.0 ± 2.19	10.6 ± 1.89	11.5 ± 0.94	12.2 ± 0.85	11.9 ± 0.96
5	Single-limb support time (sec)	0.43 ± 0.020	0.41 ± 0.066	0.42 ± 0.051	0.46 ± 0.026	0.44 ± 0.020	0.45 ± 0.025
6	Limb advancement time (sec)	0.21 ± 0.023	0.22 ± 0.019	0.22 ± 0.021	0.27 ± 0.023	0.28 ± 0.018	0.28 ± 0.021
7	Step time (sec)	0.53 ± 0.019	0.49 ± 0.078	0.51 ± 0.060	0.59 ± 0.027	0.57 ± 0.028	0.58 ± 0.028
8	Double step time (sec)	1.06 ± 0.031	1.01 ± 0.038	1.03 ± 0.042	1.20 ± 0.044	1.15 ± 0.040	1.17 ± 0.048
9	Step length (m)	0.46 ± 0.060	0.44 ± 0.039	0.45 ± 0.051	0.59 ± 0.033	0.58 ± 0.016	0.58 ± 0.027
10	Step width (m)	0.17 ± 0.0100	0.17 ± 0.0048	0.17 ± 0.0080	0.17 ± 0.014	0.17 ± 0.0071	0.17 ± 0.011
11	Double-step length(m)	0.92 ± 0.061	0.88 ± 0.051	0.90 ± 0.059	1.18 ± 0.028	1.16 ± 0.025	1.17 ± 0.028
12	Walking pace (m/sec)	0.87 ± 0.075	0.87 ± 0.040	0.87 ± 0.059	1.00 ± 0.052	1.01 ± 0.041	1.01 ± 0.047

ние, беспокоила тревожность; падений не было. После коррекции противопаркинсонической терапии (добавлены таблетки леводопы + бенсеразид 250 мг по 1/4 таб. × 3 р в день через 1–1,5 ч после еды — постоянно, клоназепам 2 мг по 1/4 таб. на ночь, проноран 50 мг 1 таб. через 1 ч после еды — постоянно) пациентка проходила курс реабилитации нарушений ходьбы на базе кафедры нервных болезней в октябре 2019 г. Реабилитация заключалась в использовании устройства, активизирующего задний толчок при ходьбе; на фоне занятий отмечалось нарастание длины шага, появление марша руками во время ходьбы, повысилась толерантность к физической нагрузке, рекомендовано продолжать реабилитационные мероприятия.

В неврологическом статусе: глазные щели D = S, зрачки D = S, зрачковые реакции удовлетворительные. Движения глазных яблок в полном объеме, несколько замедленные. Нистагма, диплопии нет. Легкая слабость конвергенции. Тригеминальные точки безболезненные. Чувствительных расстройств нет.

Носогубные складки симметричны. Язык по средней линии. Мягкое нёбо подвижно, язычок по средней линии, глоточные рефлексы сохранены. Глотание — дисфагия. Голос монотонный. Сухожильные рефлексы высокие, без четкой разницы, патологических рефлексов нет. Мышечный тонус грубо повышен по экстрапирамидному типу, больше слева. Аксиальная ригидность выраженная. Мышечная сила сохранена. Гипокинезия выраженная, больше слева. Чувствительных расстройств нет. КПП — норма. Тремор покоя пальцев рук низкочастотный, крупно-среднеамплитудный, более выражен слева. Тремор покоя нижней челюсти. В позе Ромберга шаткость. Ходьба: ахейрокинез, длина шага снижена, шаркает, хуже левой ногой, пропульсии. Выраженная «поза просителя». Синергии нарушены в пробах. Менингеальные симптомы (–). Симптомы натяжения (–).

Обследование пациентки проводилось в лаборатории ВАД ФГБУ ФСНКЦ ФМБА России, использовался программно-аппаратный комплекс Vicon

Таблица 2

Средние значения углов и амплитуды сгибания-разгибания бедра пациента с БП и здорового пациента за 10 циклов ходьбы

	Пациент с БП		Здоровый пожилой человек	
	левая нога	правая нога	левая нога	правая нога
	Me [P ₂₅ ; P ₇₅]			
Угол 2	-9,48 [-11,85; -7,30]	-9,87 [-11,95; -5,95]	-15,17 [-16,49; -14,25]	-17,90 [-18,39; -17,18]
Угол 3	22,01 [20,25; 24,56]	33,16 [31,50; 35,99]	25,54 [24,44; 27,05]	26,39 [24,94; 27,16]
Δ1	30,41 [28,93; 35,11]	42,42 [37,74; 45,35]	41,35 [39,65; 42,31]	44,12 [43,53; 44,97]

Table 2

Mean values of angles and amplitudes of flexion-extension of the hip in a patient with PD and in a healthy patient over 10 gait cycles

	Patient with PD		Healthy elderly person	
	Left foot	Right foot	Left foot	Right foot
	Me [P ₂₅ ; P ₇₅]			
Angle 2	-9.48 [-11.85; -7.30]	-9.87 [-11.95; -5.95]	-15.17 [-16.49; -14.25]	-17.90 [-18.39; -17.18]
Angle 3	22.01 [20.25; 24.56]	33.16 [31.50; 35.99]	25.54 [24.44; 27.05]	26.39 [24.94; 27.16]
Δ1	30.41 [28.93; 35.11]	42.42 [37.74; 45.35]	41.35 [39.65; 42.31]	44.12 [43.53; 44.97]

Motion Capture Systems. Комплекс состоит из 12 инфракрасных видеокамер, трех силовых платформ, коммутатора и компьютера с установленным программным обеспечением.

Процедура обследования включает в себя несколько этапов. Первым этапом проводится антропометрия для «привязки» индивидуальных размеров регистрируемых сегментов тела к компьютерной модели, затем на костные ориентиры пациента прикрепляются светоотражающие маркеры, после чего обследуемому предлагается пройти по трем силовым платформам в обычном темпе. Во время ходьбы камеры фиксируют положение маркеров в пространстве, а платформы регистрируют реакцию опоры. Для повышения достоверности результатов каждому испытуемому рекомендуется совершить как минимум 10 шаговых циклов по трем силовым платформам.

При оценке темпо-ритмовых параметров ходьбы с использованием трехмерного ВАД получены следующие данные (табл. 1).

Как следует из представленной таблицы, метод ВАД позволяет зарегистрировать такие изменения ходьбы пациента с БП, как ускорение смены шагов (темп ходьбы) при укорочении длины одиночного и двойного шага, уменьшении времени двойной опоры, ускорении момента отрыва ноги. Указанные изменения характеризуют переход пациента при БП на более быстрый короткий бегущий шаг (семенящая походка). Несмотря на ускорение смены шага, как видно из таблицы, скорость ходьбы снижается, по сравнению со здоровым испытуемым той же возрастной группы.

Ширина шага (расстояние между медиальными лодыжками) не изменяется, так как у пациентки на данном этапе нет признаков расширения площади опоры, в отличие от синдрома мозжечковой атаксии и подкорково-лобной дисбазии.

Метод трехмерного ВАД позволяет оценить амплитуду движения различных частей тела в разные моменты цикла шага и провести сопоставление этой информации с показателями подометрии.

Исследование величины амплитуды движения в голеностопном, тазобедренном, коленном суставах у пациента с БП приведено в следующих графиках (рис. 1–3).

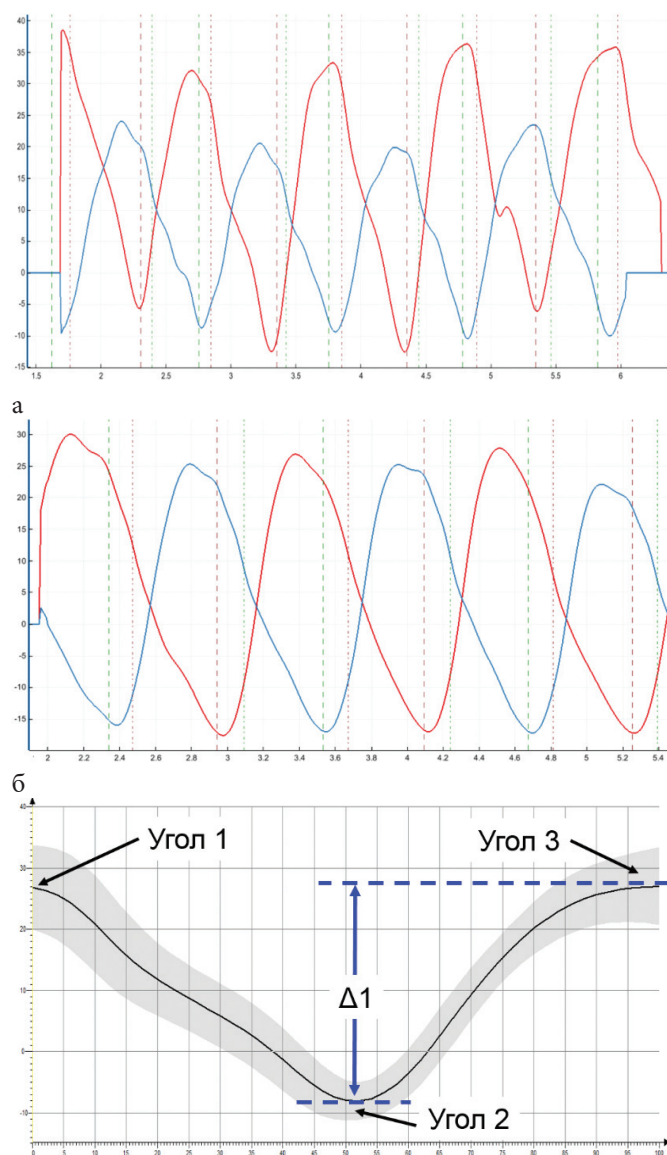
Как видно из графика на рис. 1 (а), во время ходьбы у пациента с БП присутствует асимметрия между левой и правой конечностями в виде снижения угла сгибания левой ноги в тазобедренном суставе в период ее переноса, что соответствует стороне с клинически более выраженным паркинсонизмом (угол 3 слева — Me [P₂₅; P₇₅]: 21,97 [20,18; 23,7]; угол 3 справа — Me [P₂₅; P₇₅]: 34,49 [32,63; 36,00]).

При анализе всех циклов ходьбы больного с БП обращает на себя внимание значительное (более чем на 12 градусов) снижение амплитуды сгибания-разгибания бедра (Δ1, табл. 2) на стороне клинически более выраженного паркинсонизма, а также недостаточное разгибание бедра (угол 2, табл. 2) по сравнению со здоровым испытуемым как по левой, так и по правой ноге.

Ниже представлены результаты оценки методом трехмерного ВАД динамики сгибания-разгибания в коленном суставе во время цикла шага пациента с БП в сопоставлении с нормативными показателями и схемой интерпретации.

При анализе графика сгибания-разгибания коленного сустава во время одного шагового цикла у пациента с БП (а) определяется значительная асимметрия угла сгибания колена в первый период двойной опоры и в начале периода одиночной опоры (угол 1 слева — Me [P₂₅; P₇₅]: 18,62 [18,06; 19,90]; угол 1 справа — Me [P₂₅; P₇₅]: 28,31 [25,10; 29,14]). В фазу одиночной опоры на графике каждого шагового цикла обращает внимание присутствие дополнительных пиков графика, больше с наиболее пораженной стороны (левой), со средней частотой колебаний слева 4,66, справа — 3,92 Гц, амплитудой слева 6,94, справа — 11,7 градусов, что, возможно, является проявлением скрытого дрожания ног.

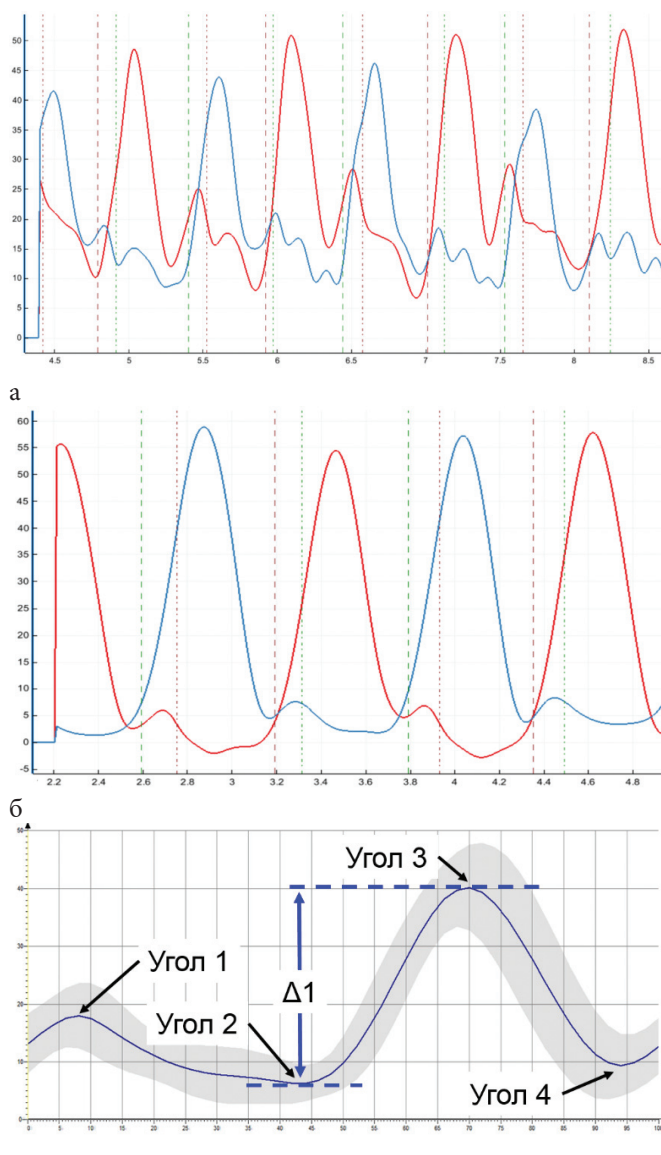
При сравнении графиков пациента с БП (а) и здорового добровольца (б) в целом наблюдаются отличия как по амплитудным, так и по временным



В

Рис. 1. График сгибания-разгибания правого (красный) и левого (синий) бедра в тазобедренном суставе во время цикла ходьбы пациента с БП (а) и здорового пациента (б), где по оси X — время в секундах, по оси Y — угол сгибания-разгибания в градусах. Ниже схема интерпретации показателей, включающая один цикл двойного шага (в), где по оси X — процент шагового цикла, по оси Y — угол сгибания-разгибания в градусах; угол 1 — угол сгибания бедра в первый период двойной опоры; угол 2 — угол максимального разгибания бедра во второй период двойной опоры; угол 3 — угол максимального сгибания бедра в период переноса исследуемой конечности; Δ1 — амплитуда сгибания-разгибания бедра

Fig. 1. The curve of flexion-extension of the right (red) and left (blue) hip in the coxofemoral joint during the gait cycle of a patient with PD (a) and a healthy patient (b); the X-axis is the time in seconds, the Y-axis is the angle of flexion-extension in degrees. The diagram of indicators interpretation is given below. It includes one cycle of a double step (в), where the X-axis is the percentage of the gait cycle, and the Y-axis is the flexion-extension angle in degrees. Angle 1 is the angle of hip flexion in the first period of limb advancement; angle 2 is the angle of maximum hip extension during the second period of limb advancement; angle 3 is the angle of maximum flexion of the hip during the feet adjustment; Δ1 is hip flexion-extension amplitude. УГОЛ — ANGLE



В

Рис. 2. График сгибания-разгибания правого (красный) и левого (синий) коленного сустава во время цикла ходьбы пациента с БП (а) и здорового пациента (б), где по оси X — время в секундах, по оси Y — угол сгибания-разгибания в градусах. Ниже схема интерпретации показателей, включающая один цикл двойного шага (в), где по оси X — процент шагового цикла, по оси Y — угол сгибания-разгибания в градусах; угол 1 — угол сгибания колена в начале периода одиночной опоры; угол 2 — угол максимального разгибания колена в конце периода одиночной опоры; угол 3 — угол максимального сгибания колена в период переноса; угол 4 — угол разгибания колена в конце периода переноса; Δ1 — амплитуда сгибания-разгибания коленного сустава.

Fig. 2. The curve of flexion-extension of the right (red) and left (blue) knee joints during the gait cycle of a patient with PD (a) and a healthy patient (b). The X-axis is the time in seconds, the Y-axis is the flexion-extension angle in degrees. The diagram of indicators interpretation is given below. It includes one cycle of a double step (в), where the X-axis is the percentage of the step cycle, and the Y-axis is the flexion-extension angle in degrees. Angle 1 is knee flexion angle at the beginning of the single-limb support period; angle 2 is the angle of maximum knee extension at the end of the single-limb support period; angle 3 is the angle of maximum knee flexion during stride time; angle 4 is the angle of knee extension at the end of stride time; Δ1 is the flexion-extension of the knee joint amplitude. УГОЛ — ANGLE

Таблица 3

Средние значения углов и амплитуды сгибания-разгибания коленного сустава пациента с БП и здорового пациента за 10 циклов ходьбы

	Пациент с БП		Здоровый пожилой человек	
	левая нога	правая нога	левая нога	правая нога
	Me [P ₂₅ ; P ₇₅]			
Угол 2	1,93 [1,27; 2,86]	6,55 [5,14; 8,10]	1,20 [0,50; 2,46]	-1,72 [-2,55; -0,32]
Угол 3	35,92 [33,75; 38,23]	49,52 [47,87; 51,05]	57,82 [56,04; 59,53]	58,86 [56,87; 60,84]
Δ1	33,74 [30,97; 35,48]	42,03 [40,47; 45,56]	56,34 [55,54; 57,64]	60,47 [57,86; 62,90]

Table 3

Mean values of angles and amplitudes of the knee joint flexion-extension in a patient with PD and in a healthy patient over 10 gait cycles

	Patient with PD		Healthy elderly person	
	Left foot	Right foot	Left foot	Right foot
	Me [P ₂₅ ; P ₇₅]			
Angle 2	1.93 [1.27; 2.86]	6.55 [5.14; 8.10]	1.20 [0.50; 2.46]	-1.72 [-2.55; -0.32]
Angle 3	35.92 [33.75; 38.23]	49.52 [47.87; 51.05]	57.82 [56.04; 59.53]	58.86 [56.87; 60.84]
Δ1	33.74 [30.97; 35.48]	42.03 [40.47; 45.56]	56.34 [55.54; 57.64]	60.47 [57.86; 62.90]

Таблица 4

Средние значения углов и амплитуды сгибания-разгибания голеностопного сустава пациента с БП и здорового пациента 10 циклов ходьбы

	Пациент с БП		Здоровый пожилой человек	
	левая нога	правая нога	левая нога	правая нога
	Me [P ₂₅ ; P ₇₅]			
Угол 1	21,96 [19,80; 23,20]	19,27 [17,62; 21,16]	18,32 [17,41; 19,09]	16,87 [16,27; 17,84]
Угол 2	-0,04 [-1,69; 2,92]	-2,34 [-4,86; -0,09]	-17,79 [-21,38; -15,18]	-18,97 [-19,92; -16,34]
Δ1	20,86 [19,54; 23,16]	22,52 [18,47; 24,01]	36,47 [34,34; 39,55]	35,47 [33,38; 37,05]

Table 4

Mean values of angles and amplitudes of ankle joint flexion-extension in a patient with PD and in a healthy patient over 10 gait cycles

	Patient with PD		Healthy elderly person	
	Left foot	Right foot	Left foot	Right foot
	Me [P ₂₅ ; P ₇₅]			
Angle 1	21,96 [19,80; 23,20]	19,27 [17,62; 21,16]	18,32 [17,41; 19,09]	16,87 [16,27; 17,84]
Angle 2	-0,04 [-1,69; 2,92]	-2,34 [-4,86; -0,09]	-17,79 [-21,38; -15,18]	-18,97 [-19,92; -16,34]
Δ1	20,86 [19,54; 23,16]	22,52 [18,47; 24,01]	36,47 [34,34; 39,55]	35,47 [33,38; 37,05]

характеристикам (снижение скорости ходьбы при увеличении количества шагов).

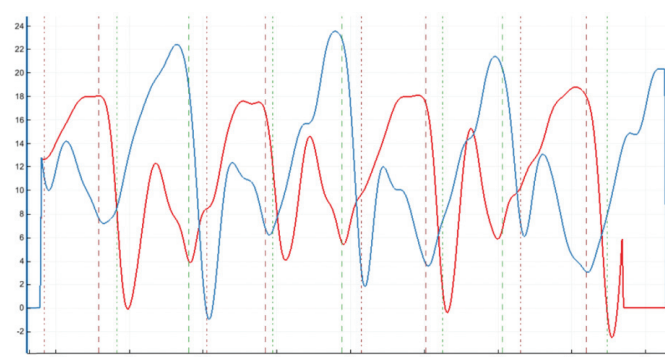
Анализ средних угловых и амплитудных значений за всю процедуру исследования у пациента с БП показывает асимметрию максимального разгибания колена в конце периода одиночной опоры (угол 2, табл. 3), а также значительное снижение угла максимального сгибания (угол 3, табл. 3) и амплитуды сгибания-разгибания коленного сустава в целом (Δ1, табл. 3), выявляемое в большей мере на стороне с клинически более выраженным паркинсонизмом (слева).

На рис. 3 представлены графики движения в голеностопном суставе во время аналогичного цикла ходьбы, зарегистрированные ВАД.

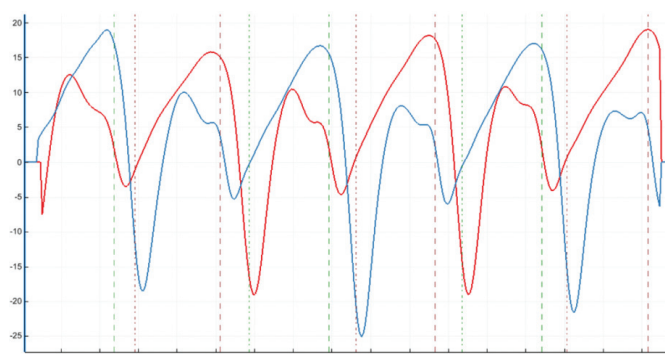
При оценке угловых характеристик голеностопного сустава у пациента с БП явной асимметрии между правой и левой стороной не отмечалось, однако по сравнению со здоровым пожилым человеком у пациента более выражено дорсальное сгибание стопы в конце периода одиночной опоры (угол 1, табл. 4) и значительно снижено плантарное сгибание стопы

в момент ее отрыва (угол 2, табл. 4). В целом амплитуда движения в голеностопном суставе у пациента меньше, чем у здорового испытуемого (Δ1, табл. 4).

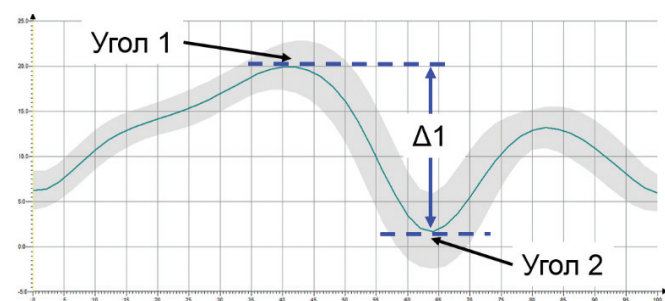
Таким образом, в результате инструментальной оценки локомоторной функции методом трехмерного ВАД у пациентки, прошедшей курс реабилитации, дополнительно выявлены следующие проблемы: переход пациентки на более быстрый короткий бегущий шаг (семенящая походка), асимметрия амплитуды сгибания-разгибания в тазобедренном и коленном суставе за счет отставания более пораженной стороны (левой), снижение общей амплитуды сгибания-разгибания в тазобедренном, коленном, голеностопном суставах по сравнению со здоровым пожилым человеком, колебание угла сгибания коленного сустава в период одиночной опоры с большей частотой на более пораженной стороне как возможное проявление скрытого дрожания ног, недостаточное сгибание коленных и разгибание тазобедренных суставов по сравнению со здоровым испытуемым, а также избыточная дорсальная флексия стопы при недостаточной плантарной флексии. При формиро-



а



б



в

Рис. 3. График сгибания-разгибания правого (красный) и левого (синий) голеностопного сустава во время цикла ходьбы пациента с БП (а) и здорового пациента (б), где по оси X — время в секундах, по оси Y — угол сгибания-разгибания в градусах. Ниже схема интерпретации показателей, включающая один цикл двойного шага (в), где по оси X — процент шагового цикла, по оси Y — угол сгибания-разгибания в градусах; угол 1 — угол максимального дорсального сгибания стопы в конце периода одиночной опоры; угол 2 — угол максимального плантарного сгибания стопы в момент ее отрыва; $\Delta 1$ — амплитуда сгибания-разгибания голеностопного сустава

Fig. 3. The curve of flexion-extension of the right (red) and left (blue) ankle joints during the gait cycle of a patient with PD (а) and a healthy patient (б), where the X-axis is time in seconds, and the Y-axis is the flexion-extension angle in degrees. The diagram of indicators interpretation is given below. It includes one limb advancement period (в), where the X-axis is the percentage of the step cycle, and the Y-axis is the flexion-extension angle in degrees. Angle 1 is the angle of maximum dorsal flexion of the foot at the end of the single-limb support period; angle 2 is the angle of maximum plantar flexion of the foot at the moment of toe off; $\Delta 1$ is flexion-extension of the ankle joint amplitude

вании программы реабилитации данные трехмерного ВАД могут быть использованы для целенаправленной реабилитации:

- выноса левой ноги (воздействие на ягодичные мышцы, проксимальные мышцы бедра методами ЛФК, механотерапии, применение СИ-терапии);
- сгибания левой ноги в коленном суставе (воздействием на задние мышцы бедра, голени, велотренировки);
- ригидности стопы (кинезиотерапевтические подходы по работе с мышцами голеностопного сустава, мобилизация методами мануальной терапии).

Обсуждение и выводы

В последние годы долгосрочная стратегия медикаментозного лечения БП направлена на создание путем медикаментозной терапии условий для сохранения физической активности, поэтому актуальной является разработка программ индивидуальной двигательной активности и физических тренировок для поддержания оптимальной мобильности пациента в течение максимально длительного времени при сведении к минимуму риска побочных действий и долгосрочных осложнений терапии [30]. Такая программа должна учитывать результаты подробного клинического и параклинического обследования пациента, при этом важную информацию о проблемах статолокомоторной системы могут дать результаты видеоанализа движений. Пример использования данных трехмерного ВАД в реабилитационной оценке локомоторной системы показал, что для выраженных стадий БП характерны темпо-ритмические изменения в виде бегущей, семенящей походки с укорочением длины одиночного шага, ускорением наступления момента отрыва стопы, сокращением фазы двойной опоры, при этом в целом скорость ходьбы падает. Характерно выявление асимметрии симптомов.

При исследовании движения суставов нижних конечностей методом видеоанализа отмечено снижение амплитуды сгибания-разгибания в тазобедренном, коленном и голеностопном суставе с наибольшим проявлением на более пораженной стороне. Недостаточное сгибание в коленных суставах в фазу переноса более пораженной ноги наряду со снижением амплитуды движения в голеностопном суставе приводит к шаркающей походке. Интересным было присутствие дополнительных пиков графика в коленном суставе в фазу одиночной опоры у пациентки с большей частотой на наиболее пораженной стороне (левой), что, возможно, является проявлением скрытого дрожания ног. В представленном нами клиническом примере не было отмечено расширения ширины шага, что является отражением отсутствия у пациентки элементов лобной дисбазии. Выявленные нами данные сопоставляются с результатами ведущих российских и зарубежных лабораторий оценки ходьбы.

Ценным результатом в исследовании локомоций при ВАД служит анализ движений верхней части ту-

ловища, а также позвоночника и таза, чему посвящено значительно меньше публикаций [11]. Важными в решении указанных проблем являются проработка методологии расположения регистрирующих датчиков и приемы проведения исследования для получения наиболее достоверной информации. Ограничивающим фактором нашего исследования явилась невозможность одновременной записи движений обеих нижних конечностей, при этом оценка движений одной и другой конечности проводилась последовательно, с последующим сопоставлением полученной информации с помощью специального компьютерного приложения, что снижает возможность одномоментной оценки положения и движения обеих конечностей в один и тот же определенный момент времени, однако в целом не мешает получению другой ценной информации о состоянии статолокомоторной системы.

Остающейся проблемой распространения ВАД в широкой практике является дороговизна исследования, при этом в последние годы все больше центров на территории России осваивают данную технологию.

Важно в выполнении исследования при БП наблюдение временных параметров повторной оценки, связанных с возможным влиянием лекарственной терапии и наличием двигательных флуктуаций и дискинезий. Среди проблем, с которыми можно столкнуться при обследовании пациентов в продвинутых стадиях заболевания, опасность падения, невозможность выполнения пациентом процедуры из-за выраженной обездвиженности.

Таким образом, персонализированная оценка локомоторной системы методом трехмерного ВАД представляет собой ценный инструмент диагностики и динамического наблюдения за пациентом, а также позволяет целенаправленно планировать лекарственное и реабилитационное воздействие с учетом выявленных проблем пациента.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, правительства Красноярского края, Краевого фонда науки и АО «Научно-производственного предприятия «Радиосвязь» в рамках научного проекта № 20-415-242902.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Левин О.С., Федорова Н.В. Болезнь Паркинсона. 3-е изд. М.: МЕДпресс-информ; 2006:352. [Levin O.S., Fedorova N.V. Parkinson's disease. 3-e izd. M.: MEDpress-inform; 2006:352. (In Russian)].
2. Doherty K.M., van de Warrenburg B.P., Peralta M.C., Silveira-Moriyama L., Azulay J.P., Gershanik O.S., Bloem B.R. Postural deformities in Parkinson's disease. *The Lancet Neurology*. 2011;10(6):538–49. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(11\)70067-9](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(11)70067-9)
3. Watanabe K., Hirano T., Katsumi K., Ohashi M., Shoji H., Hasegawa K., Yamazaki A., Ishikawa A., Koike R., Endo N., Nishizawa M., Shimohata T. Characteristics of spinopelvic alignment in Parkinson's disease: comparison with adult spinal deformity. *Journal of Orthopedic Science*. 2017;22(1):16–21. <https://doi.org/10.1016/j.jos.2016.09.013>
4. Ailon T., Smith J.S., Shaffrey C.I., Lenke L.G., Brodke D., Harrop J.S., Fehlings M., Ames C.P. Degenerative spinal deformity. *Neurosurgery*. 2015;77(4):S75–91. <https://doi.org/10.1227/NEU.0000000000000938>

5. Бородулина И.В., Арестов С.О., Гуца А.О. Особенности дегенеративного поражения позвоночника у пациентов с постуральными нарушениями на фоне болезни Паркинсона. *Нервные болезни*. 2019;2:40–45. [Borodulina I.V., Arestov S.O., Gushcha A.O. Features of degenerative lesions of the spine in patients with postural disorders associated with Parkinson's disease. *Nervnye bolezni*. 2019; 2:40–45. (In Russian)]. <https://doi.org/10.24411/2226-0757-2019-12103>
6. Djaldetti R., Mosberg-Galili R., Sroka H., Merims D., Melamed E. Camptocormia (bent spine) in patients with Parkinson's disease — characterization and possible pathogenesis of an unusual phenomenon. *Movement Disorders*. 1999;14(3):443–7. [https://doi.org/10.1002/1531-8257\(199905\)14:3<443::aid-mds1009>3.0.co;2-g](https://doi.org/10.1002/1531-8257(199905)14:3<443::aid-mds1009>3.0.co;2-g)
7. Vialle R., Levassor N., Rillardon L., Templier A., Skalli W., Guigui P. Radiographic analysis of the sagittal alignment and balance of the spine in asymptomatic subjects. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American volume*. 2005;87(2):260–7. <https://doi.org/10.2106/JBJS.D.02043>
8. Azher S.N., Jankovic J. Camptocormia: pathogenesis, classification, and response to therapy. *Neurology*. 2005; 65(3):355–9. <https://doi.org/10.1212/01.wnl.0000171857.09079.9f>
9. Левин О.С., Артемьев Д.В., Бриль Е.В., Кулуа Т.К. Болезнь Паркинсона: современные подходы к диагностике и лечению. М.: Практическая медицина; 2017; т. 1. [Levin O.S., Artem'ev D.V., Bril' E.V., Kulua T.K. Parkinson's disease: modern approaches to diagnosis and treatment. M.: Prakticheskaya meditsina; 2017; t. 1. (In Russian)].
10. Гурский И.С., Лихачев С.А., Ващенко В.В., Буняк А.Г. Нарушения произвольного постурального контроля при болезни Паркинсона и возможности их реабилитации по данным видеонализа движений. *Уральский медицинский журнал*. 2018;11:27–31. [Gurskiy I.S., Likhachev S.A., Vashchilin V.V., Bunyak A.G. Violations of voluntary postural control in Parkinson's disease and the possibility of their rehabilitation according to video analysis of movements. *Ural'skiy meditsinskiy zhurnal*. 2018;11:27–31. (In Russian)]. <https://doi.org/10.25694/URMJ.2018.11.16>
11. Wu G., Van Der Helm F.C.T., Veeger H.E.J., Makhsous M., Van Roy P., Anglin C., Nagels J., Karduna A.R., McQuade K., Wang X., Werner F.W., Buchholz B. (ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion — Part II: Shoulder, elbow, wrist and hand. *Journal of Biomechanics*. 2005;38(5):981–992. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.05.042>
12. Harris G.F., Smith P.A. (editors). Human motion analysis: current applications and future directions. New York: IEEE Press; 1996;37. <https://doi.org/10.1002/047134608X.W6606.pub2>
13. Isard M., Blake A. Visual tracking by stochastic propagation of conditional density. In: Proceeding of the 4th European Conference on Computer Vision. New York. 1996:343–356.
14. Bregler C., Malik J. Tracking people with twists and exponential maps. Proceedings 1998 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 1998. <https://doi.org/10.1109/CVPR.1998.698581>
15. Ma Y., Soatto S., Košecák J., Sastry S. An invitation to 3D vision. Interdisciplinary Applied Mathematics. New York: Springer; 2004. <https://www.springer.com/gp/book/9780387008936>
16. Cappelz A., Cappelz A., Croce U.D., Pensalfini F. Surface-marker cluster design criteria for 3-D bone movement reconstruction. *IEEE transactions on bio-medical engineering*. 1997;44(12):1165–1174. <https://doi.org/10.1109/10.649988>
17. Mündermann L., Corazza S., Andriacchi T. The evolution of methods for the capture of human movement leading to markerless motion capture for biomechanical applications. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2006;3:6. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-3-6>

18. Lanshammar H., Persson T., Medved V. Comparison between a marker-based and a marker-free method to estimate centre of rotation using video image analysis. In: *Second World Congress of Biomechanics*. Amsterdam; 1994.
19. Борзиков В.В., Рукина Н.Н., Воробьева О.В., Кузнецов А.Н., Белова А.Н. Видеоанализ движений человека в клинической практике. *Современные технологии в медицине*. 2015;7(4):201. [Borzikov V.V., Rukina N.N., Vorob'eva O.V., Kuznetsov A.N., Belova A.N. Video analysis of movements of the person in the clinical practice. *Sovremennyyi tehnologii v meditsine*. 2015;7(4):201. (In Russian)]. <https://doi.org/10.17691/stm2015.7.4.26>
20. Moeslund T.B., Granum E. A survey of computer vision based human motion capture. *Computer Vision and Image Understanding*. 2001;81(3):231–268. <https://doi.org/10.1006/cviu.2000.0897>
21. Wang L., Hu W., Tan T. Recent developments in human motion analysis. *Pattern Recognition*. 2003;36(3):585–601. [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(02\)00100-0](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(02)00100-0)
22. Скворцов Д.В. Методика исследования кинематики движений и современные стандарты. Видеоанализ. *Лечебная физкультура и спортивная медицина*. 2012;12:4–10. [Skvortsov D.V. Technique to study the kinematics of movements and modern standards. Video analysis. *Lechebnaya fizkul'tura i sportivnaya medicina*. 2012;12:4–10. (In Russian)].
23. Herda L., Fua P., Plänkers R., Boulic R., Thalmann D. Using skeleton-based tracking to increase the reliability of optical motion capture. *Human Movement Science*. 2001;20(3):313–341.
24. Royo Sánchez A.C., Aguilar Martín J.J., Santolaria Mazo J. Development of a new calibration procedure and its experimental validation applied to a human motion capture system. *Journal of Biomechanical Engineering*. 2014;136(12):124–502. [http://dx.doi.org/10.1016/s0167-9457\(01\)00050-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0167-9457(01)00050-1)
25. Лихачев С.А., Лукашевич В.А., Хроменков А.В. Метод видеоанализа ходьбы как способ объективизации поражения базальных ганглиев при болезни Паркинсона. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2011;111(12):44–47. [Lihachev S.A., Lukashevich V.A., Hromenkov A.V. Method of video analysis of walking as a way of objectifying lesions of the basal ganglia in Parkinson's disease. *Zhurnal nevrologii i psikiatrii im. S.S. Korsakova*. 2011;111(12):44–47. (In Russian)].
26. Лихачев С.А., Лукашевич В.А. Видеоанализ шагового движения: феноменология визуальной оценки. *Международный неврологический журнал*. 2012;2:178–182. [Lihachev S.A., Lukashevich V.A. Step motion video analysis: phenomenology of visual assessment. *Mezhdunarodnyj neurologicheskij zhurnal*. 2012;2:178–182. (In Russian)].
27. Грачева Е.В., Милюхина И.В., Лебедев П.В., Цикунов С.Г. Биомеханические маркеры прогрессирования нарушений ходьбы при болезни Паркинсона. *Российский неврологический журнал*. 2019;4:16–22. [Gracheva E.V., Miljuhina I.V., Lebedev P.V., Cikunov S.G. Biomechanical markers of gait impairment progression in Parkinson's disease. *Russian neurological journal*. 2019;(4):16–22. (In Russian)].
28. Левин О.С., Юнищенко Н.А. Нарушение ходьбы и постральной устойчивости при болезни Паркинсона: клинико-кинематический анализ. Современные технологии диагностики и реабилитации в неврологии и ортопедии, под редакцией Д.В. Скворцова. М.: Медика; 2005:130–137. [Levin O.S., Yunishchenko N.A. Gait and postural stability disorder in Parkinson's disease: clinical and kinematic analysis. Modern technologies of diagnostics and rehabilitation in neurology and orthopedics, edited by D.V. Skvortsova. M.: Medika; 2005:130–137].
29. Левин О.С., Юнищенко Н.А. Сравнительный анализ нарушений ходьбы у пациентов с дисциркуляторной энцефалопатией и болезнью Паркинсона. Тезисы участников Международного конгресса «Восстановительная медицина и реабилитация-2005». М.: 2005:83–84. [Levin O.S., Yunishchenko N.A. Comparative analysis of gait disorders in patients with discirculatory encephalopathy and Parkinson's disease. Theses of the participants of the International Congress «Restorative Medicine and Rehabilitation-2005». M.: 2005:83–84].
30. Амосова Н.А., Смоленцева И.Г. Методы реабилитации при болезни Паркинсона. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. Спецвыпуски. 2014;114(6):80–86. [Amosova N.A., Smolenceva I.G. Rehabilitation methods for Parkinson's disease. *Zhurnal nevrologii i psikiatrii im. S.S. Korsakova*. Specvypuski. 2014;114(6):80–86. (In Russian)].

Поступила 07.09.2020
Принята в печать 24.11.2020