

10. Kruchinin P.A., Kholmogorova N.V., Kruchinina A.P. Ispol'zovanie komponentov ballistogramm, obuslovlennykh serdechnoy deyatel'nost'yu, pri issledovanii uderzhaniya chelovekom zadannoy pozy [The use of components of bullestorm due to cardiac activity in the study of retention by a person of a given pose], *Inzhenery Vestnik Dona* [Journal of Engineering Don], 2012, No. 4 (Part 1).
11. Gusak A.A., Brichikova E.A. Spravochnik po vysshey matematike [Handbook of higher mathematics]. Minsk: Tetra Sistems, 1999, 640 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.Б. Старченко.

Писаренко Олег Александрович – ЗАО «Особое конструкторское бюро «РИТМ»; e-mail: office@stabilan.com.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 99; тел.: 88634623190; инженер.

Pisarenko Oleg Aleksandrovich – JSC «Special design office «RITM»; e-mail: office@stabilan.com.ru; 99, Petrovskaya street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634623190; engineer.

УДК 612.76

**Н.В. Холмогорова, С.С. Слива, О.А. Писаренко, Г.А. Переяслов,
П.А. Кручинин, Ю.С. Левик, В.Ю. Шлыков**

**КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ
НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА СИЛОМОМЕНТНЫМ
АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫМ КОМПЛЕКСОМ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

Разработана и апробирована технология неинвазивной оценки функциональных состояний нервной системы человека, включающая модель силомоментного аппаратно-программного комплекса (АПК) нового поколения, позволяющую на основе анализа сигналов АПК оценить состояние ЦНС в соответствии с критериями, общепринятыми в физиологии и медицине. В отличие от известных аналогов, данный АПК оснащен шестикомпонентными силомоментными датчиками, регистрирующими силы и моменты во всех точках взаимодействия частей тела обследуемого с внешним миром, что позволяет анализировать как быстрые высокочастотные, так и медленные постуральные микро движения тела человека и его звеньев. Для выделения и анализа быстрых постуральных микро движений разработана программа частотного анализа стабילו- и баллистограмм. Для анализа стационарных участков программа используется Фурье анализ на базе метода Велча. Анализ нестационарных участков осуществляется с использованием вейвлетов Морле. Для определения особенностей вегетативной регуляции предусмотрена возможность регистрации и программной обработки частоты дыхания и кардиограммы, а также регистрация и анализ КГР. Пилотная апробация показала, что «очувствление» внешнего пространства, с помощью АПК является эффективным приемом, позволяющим выявить скрытые проявления патологического и усиленного физиологического тремора. Результаты позволяют говорить об эффективности использования предлагаемой технологии в целях диагностики ранних неврологических нарушений, а также для выявления динамики нормальных функциональных состояний человека.

Неинвазивная методика; диагностика функционального состояния ЦНС; аппаратно-программный комплекс; кресло с силомоментным чувствление; тремор; мышечный тонус.

N.V. Kholmogorova, S.S. Sliva, O.A. Pisarenko, G.O. Pereyaslov, P.A. Kruchinin,
Yu.S. Levik, V.Yu. Shlykov

COMPREHENSIVE EVALUATION OF FUNCTIONAL STATES OF HUMAN NERVOUS SYSTEM USING A FORCE-TORQUE APPARATUS-PROGRAM COMPLEX OF NEW GENERATION

The noninvasive evaluation technology of the functional states of the human nervous system, including the model of the new generation force-torque hardware-software complex (HSC), which allows to evaluate the state of the central nervous system in accordance with the criteria generally accepted in physiology and medicine on the basis of the HSC signals was developed and tested. In contrast to known analogs this HSC is equipped with six-component force-torque sensors recording the forces and torques at all points of interaction between parts of the subject body and the outside world that allows us to analyze both fast and slow postural micro movements of the human body and its parts. For the detection and analysis of fast postural micromovements we proposed to use spectral method of signal processing; so a program of frequency analysis of stabilogram and ballistogram was developed. For the stationary intervals program analysis uses Fourier analysis based on Welch method. The analysis of non-stationary segments is performed using Morlet wavelets. For determining the characteristics of autonomic regulation the possibility of recording and processing of respiratory rate, heart rate and galvanic skin response is provided. The results showed that sensing all surfaces with which a sitting subject interacts, is an effective technique that allows to reveal the hidden manifestations of pathological and enhanced physiological tremor. The results allow us to speak about the effectiveness of the proposed technology for the diagnosis of early neurological disorders, as well as to identify the dynamics of normal human functional states.

Non-invasive method; evaluation of functional state of CNS; apparatus-program complex; chair with force-torque sensors; tremor; muscle tonus.

Введение. В последнее время для оценки функционального состояния и диагностики неврологических нарушений человека все чаще используются стабилоплатформы и силомоментные осязательные кресла. Однако широкое применение силомоментных АПК при оценке динамики индивидуального функционального состояния человека затруднено в связи с трудностью интерпретации регистрируемых сигналов в соответствии с общепринятыми в физиологии и практической медицине критериями. Существующая постурографическая литература оперирует понятиями постуральных стратегий, синергий, спектров мощности колебаний, принятыми в биомеханике и достаточно далекими от круга понятий, которые используют практикующие врачи, тренеры, педагоги, дефектологи. Поэтому актуальна задача интерпретации сигналов силомоментных АПК и выделения наиболее информативных показателей. Другой задачей, неразрывно связанной с первой, является поиск эффективных методических приемов и тестов, которые позволили бы обнаружить изменения функционального состояния организма человека, подобно тому, как тест Ромберга выявляет нарушения в системе поддержания вертикальной позы.

Цель работы состояла в разработке технологии неинвазивной оценки функциональных состояний нервной системы человека, которая включает: создание:

- ◆ модели силомоментного аппаратно-программного комплекса (АПК) нового поколения;
- ◆ программ цифровой обработки частотного спектра сигналов силомоментных датчиков и распознавания сигналов датчиков АПК;
- ◆ набора методических приемов и тестовых заданий для проведения обследований состояний центральной нервной системы (ЦНС) человека.

Методика. Исследования, проведенные с использованием АПК «Многофункциональное кресло» [1] позволили определить круг задач, связанных с разработкой АПК нового поколения «Многокомпонентное кресло» (МКК). В МКК пре-

дусмотрено использование усовершенствованных сенсоров и модернизированного электронного блока, основанного на современных принципах, обеспечивающего введение дополнительных каналов регистрации данных и связь с персональным компьютером (рис. 1, 2).

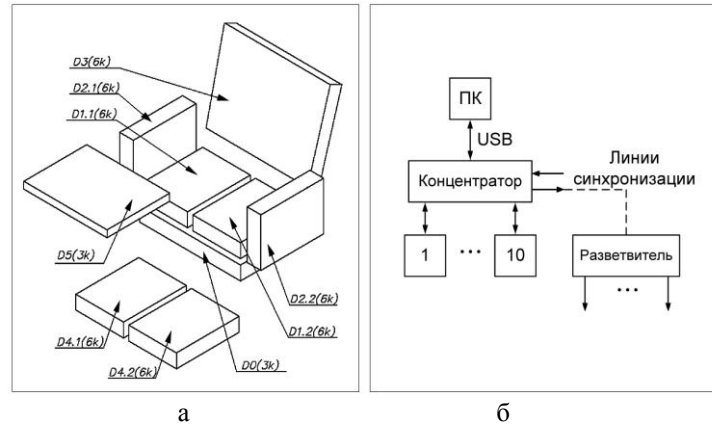


Рис. 1. Условное расположение силомоментных платформ (А) и структурная схема электронного блока АПК «Многокомпонентное кресло» (Б): D0(3k), D5(3k) – 3-х компонентные силомоментные платформы; D1-D4(6k) – 6-ти компонентные силомоментные платформы (подлокотники, сиденье, спинка, опоры под ноги). 1-10 – подключаемые платформы и дополнительные каналы

В отличие от известных аналогов, МКК оснащено шестикомпонентными силомоментными датчиками, регистрирующими силы и моменты во всех точках взаимодействия частей тела обследуемого с внешним миром, что позволяет анализировать как быстрые высокочастотные, так и медленные постуральные микро движения тела человека и его звеньев.



Рис. 2. Аппаратно-программный комплекс «Многокомпонентное кресло»

Электронный блок МКК представляет собой распределенную систему сбора данных. Синомоментные платформы и прочие дополнительные каналы содержат функционально законченные электронные узлы, осуществляющие аналого-цифровое преобразование и передающие данные в цифровом виде. Сбор данных от синомоментных платформ и управление линиями синхронизации осуществляется через концентратор. Кроме того, концентратор обеспечивает связь АПК с персональным компьютером (ПК) через стандартный интерфейс обмена данными USB (рис. 2). Частота дискретизации данных по всем каналам составляет 50 Гц. Совмещение регистрируемых сигналов по временной шкале лежит в пределах окна размером 20 миллисекунд.

Программное обеспечение «Stabmed» осуществляет управление линиями синхронизации, реализует визуализацию и запись сигналов по всем используемым каналам, анализ сигналов с помощью стандартных способов обработки, экспорт сигналов в текстовом виде для их анализа сторонними программами обработки сигналов. Наряду с этим для выделения и анализа быстрых постуральных микро движений разработана программа «Частотный анализ стабильности и баллистограмм», позволяющая анализировать стационарные участки сигнала с помощью Фурье анализа (включая метод Велча), а нестационарные участки – с использованием вейвлет-анализа Морле.

В состав МКК введены дополнительные физиологические каналы регистрации частоты дыхания, кардиоритма и канал оценки кожно-гальванической реакции (КГР). Это позволяет оценить характер вегетативной регуляции организма и проследить динамику развития стрессовых реакций, возникающих у человека в процессе обучения, трудовой деятельности т.д.

Технические возможности АПК «МКК» и результаты исследований, проведенных на его прототипе АПК «Многофункциональное кресло» [2, 3, 4] позволили на основе сигналов синомоментных датчиков, подойти к оценке общепринятых в физиологии и медицине показателей функционального состояния нервной системы, таких как уровень тонуса и тремор.

В пилотных исследованиях, приняло участие 20 добровольцев (здоровые люди в возрасте 18–20 лет и пациенты клиники при НЦН РАМН с нарушениями функции ЦНС), давших информированное согласие на участие в исследовании.

Для того чтобы оценить возможность использования МКК в диагностике нормальных функциональных состояний здорового человека, отражающихся в характере тремора, был проведен сравнительный анализ мощности спектров сигналов синомоментных датчиков МКК и ритмограммы сидящего на нем человека, записанной и проанализированной с помощью АПК «Варикард 1.4». Были исследованы функциональные состояния студентов в двух, различающихся по эмоциональному напряжению ситуациях: в условиях повседневных занятий и при экзаменационном стрессе.

Для оценки эффективности использования МКК при диагностике ранних нарушений состояния ЦНС проводилось сопоставление результатов наших исследований с клиническими заключениями пациентов с неврологическими нарушениями.

Обнаружить изменения функционального состояния организма человека по-могли:

- ◆ функциональные нагрузочные пробы, усиливающие генерацию физиологического тремора;
- ◆ методические приемы, снижающие центральные воздействия на локальный физиологический тремор.

Результаты. Согласно разработанному протоколу обследования [2, 3] человек неподвижно сидел в МКК, откинувшись на спинку кресла. Предплечье его левой руки лежало на подлокотнике, а локоть правой – упирался в подлокотник

кресла под углом около 30 градусов. С целью усиления физиологического тремора в правую руку обследуемому через 1 мин. после начала регистрации давали груз 1,5–2 кг и просили удерживать его в течение 1–2 мин. (функциональная нагрузочная проба). Выбор массы груза определялся физическими возможностями обследуемого. Для снижения центральных воздействий на локальный физиологический тремор во время удержания груза обследуемому показывали видеофильм «action», длительностью 0,5–1 мин. Регистрация сигналов силомоментных датчиков АПК проводилась до, во время и по завершении статической работы.

Выполнение функциональной нагрузочной пробы, сидящим в МКК, спокойным здоровым человеком сопровождалось появлением усиленного физиологического тремора в руке, удерживающей груз, прекращающимся при его снятии. При этом степень выраженности физиологического тремора других частей тела, соприкасающихся с осязательными поверхностями МКК, в течение всего обследования оставалась неизменной (рис. 3).

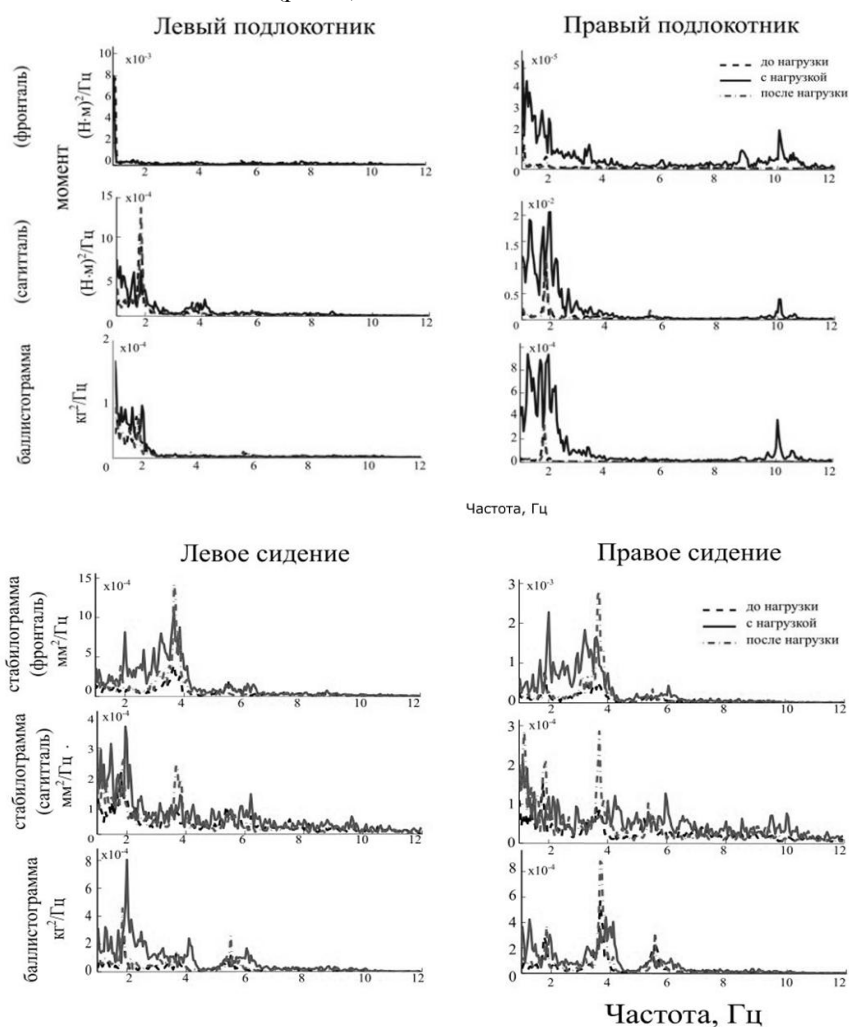


Рис. 3. Спектр мощности сигналов АПК «Многокомпонентное кресло» при спокойном сидении здорового человека (пунктир) и при удержании им груза в 2 кг в правой руке (сплошная линия)

У спокойно сидящего пациента с диагнозом болезнь Паркинсона (БП) локальные пики мощности спектра в диапазоне 6–8 Гц наблюдались в спектрограммах практически всех сигналов силомоментных датчиков ММК как до, так и во время удержания груза в руке (рис. 4). У людей с неврологическими нарушениями психогенной природы удержанию рукой груза в условиях спокойного сидения соответствовало появление 6-8 Гц тремора в отдельных частях тела, соприкасающихся с датчиками МКК, которое отсутствовало при сидении без груза.

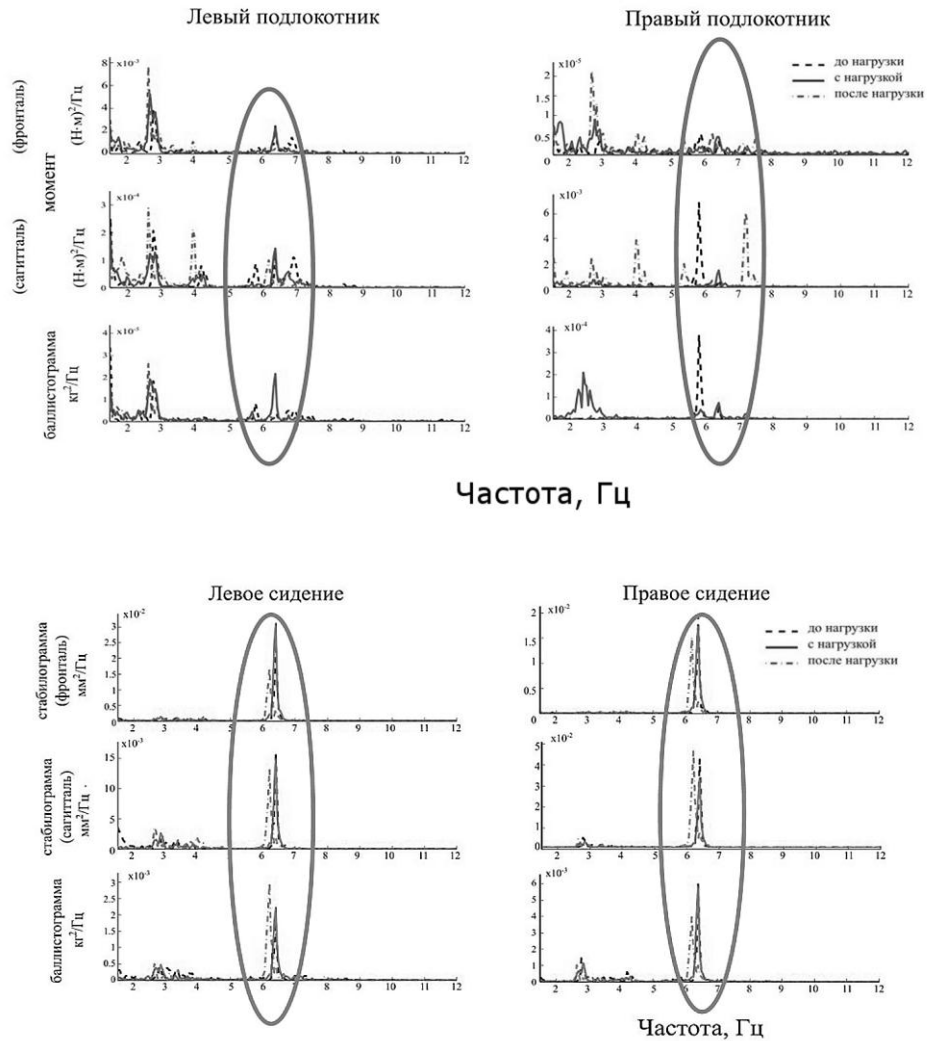


Рис. 4. Спектр мощности сигналов АПК «Многокомпонентное кресло» при спокойном сидении пациента с болезнью Паркинсона (пунктир) и при удержании им груза в 1.5 кг в правой руке (сплошная линия)

На рис. 5 представлены коэффициенты вейвлета Морле баллистограмм здорового человека (а, б) и пациентов с начальной стадией истерии (в) и болезнью Паркинсона (г) при просмотре видеофильма на фоне удержания груза в правой руке. Как видно из рис. 5, показ видеофильма в ситуации умеренного эмоционального напряжения у здорового человека (5,а) и пациента с органическим по-

ражением ЦНС (пациент с болезнью Паркинсона – 5,г) существенно не влиял на характер тремора, наблюдаемый на фоне выполнения функциональной нагрузочной пробы. У пациента с заболеванием психогенной природы (пациентов с начальной стадией истерии – 5,в) в течение просмотра видеосюжета высокочастотная составляющая тремора, выявленного на фоне функциональной нагрузочной пробы, уменьшалась.

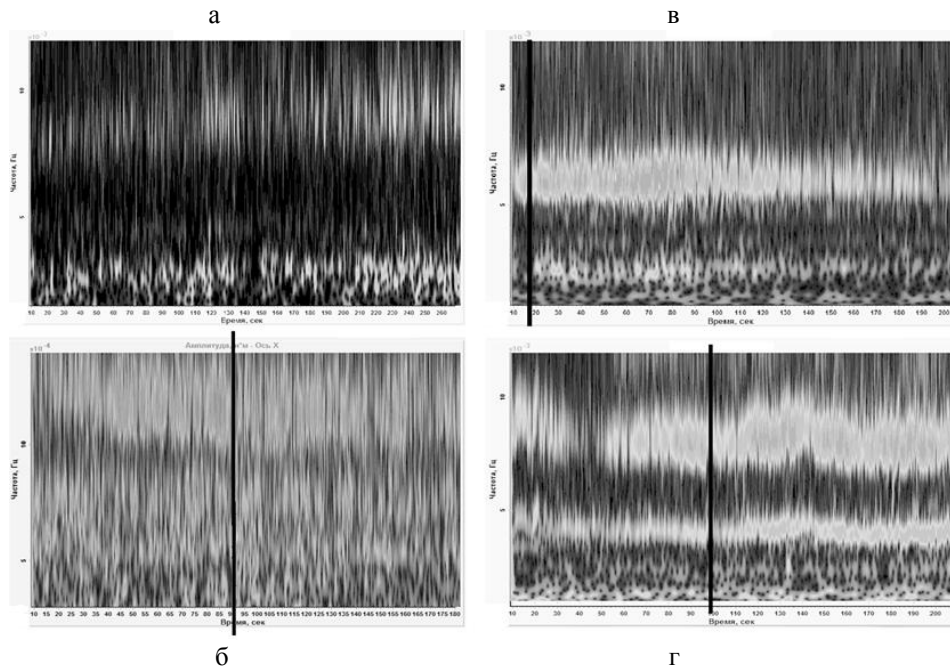


Рис. 5. Коэффициенты вейвлета Морле баллистограмм здорового человека (а, б) и пациентов с начальной стадией истерии (в) и с болезнью Паркинсона (г) при просмотре видеофильма на фоне удержания груза в правой руке.

Как показали наши исследования, показ видеофильма на фоне нагрузочной пробы в ситуации повышенного эмоционального напряжения, обусловленного экзаменом, у всех здоровых обследованных сопровождался усилением высокочастотной составляющей физиологического тремора в руке, удерживающей груз. У 45 % из них, одновременно с усилением физиологического тремора в правой руке, удерживающей груз, наблюдалось усиление физиологического тремора в других частях тела, соприкасающихся с тензодатчиками МКК: спокойно лежащей на подлокотнике кресла левой руке, в ногах и т.д. Выраженность тремора в разных частях тела определялась уровнем эмоционального напряжения обследуемого.

Для силомоментных датчиков сидений на рис. представлены спектры мощности баллистограмм (нижние графики), сагиттальной (средние графики) и фронтальной (верхние графики) стабิโลграмм. Для силомоментных датчиков подлокотников – динамика спектров мощности баллистограмм (нижние графики) и спектров мощности моментов в сагиттальной (средний график) и фронтальной (верхний график) плоскостях.

Для силомоментных датчиков сидений на рис. представлены спектры мощности баллистограмм (нижние графики), сагиттальной (средние графики) и фронтальной (верхние графики) стабิโลграмм. Для силомоментных датчиков подлокот-

ников – динамика спектров мощности баллистограмм (нижние графики) и спектров мощности моментов в сагиттальной (средний график) и фронтальной (верхний график) плоскостях.

Анализ variability сердечного ритма показал, что у отдельных обследуемых ситуация экзамена приводила к повышению ЧСС до 110 уд./мин, к снижению показателей, отражающих активность парасимпатической системы (SDNN и HF) и вызывала резкое увеличение «индекса напряженности» (ИН), являющегося маркером активности симпатической системы организма. Такое изменение в вегетативной регуляции сопровождалось усилением высокочастотной составляющей статического тремора и появлением в спектре сигналов датчиков МКК, соприкасающихся с телом обследуемого, высокоамплитудных пиков в диапазоне 2–5 Гц. Учитывая данные о проявлении сердечной деятельности в сигналах силомоментных датчиков [5, 6, 7], можно предположить, что наблюдаемые высокоамплитудные пики на частоте 2–5 Гц отражают напряжение регуляторных механизмов организма.

Просмотр обследуемыми видеофильма: а, в, г – в состоянии умеренного эмоционального напряжения; б – в ситуации экзаменационного стресса. Вертикальная линия обозначает момент начала показа видеофильма

Заключение. Наше исследование показало, что «очувствление» внешнего пространства, с помощью АПК «Многокомпонентное кресло» является эффективным приемом, позволяющим выявить скрытые проявления патологического и усиленного физиологического тремора. Данные, полученные при апробации разрабатываемой технологии, позволяют говорить об ее эффективности для целей диагностики ранних неврологических нарушений, а также для выявления динамики нормальных функциональных состояний человека.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Холмогорова Н.В., Слива С.С., Писаренко О.А., Переяслов Г.А., Кручинин П.А. Многофункциональное кресло / Патент на полезную модель №91269 с приоритетом от 12. 11. 2009.
2. Холмогорова Н.В., Кручинин П.А., Шлыков В.Ю., Слива С.С. Диагностика функциональных состояний человека на основе силоординатных аппаратно-программных комплексов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 9 (110). – С. 170-174.
3. Холмогорова Н.В., Кручинин П.А., Левик Ю.С., Слива С.С. Шлыков В.Ю. Диагностика ранних неврологических нарушений с помощью силомоментных аппаратно-программных комплексов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 9 (134). – С. 256-261.
4. Кручинин П.А., Лебедев А.В., Холмогорова Н.В. Особенности частотного анализа сигналов силомоментных датчиков в задаче исследования физиологического тремора // Российский журнал биомеханики. – 2013. –Т. 17, № 1. – С. 64-77.
5. Кручинин П.А., Холмогорова Н.В., Кручинина А.П. Использование компонентов баллистограмм, обусловленных сердечной деятельностью, при исследовании удержания человеком заданной позы // Инженерный Вестник Дона. – 2012. – № 4 (Ч. 1).
6. Breme N., Oggero E., Pagnacco G. Power spectrum characteristics of physiologic and pathologic tremor // Acta of Bioengineering and Biomechanics. – 1999. – Vol. 1, No. 1. – P. 71-88.
7. Breme N. Method for analysis of abnormal body tremors / US Patent N US6,936,016B2, aug 30, 2005.

REFERENCES

1. Kholmogorova N.V., Sliva S.S., Pisarenko O.A., Pereyaslov G.A., Kruchinin P.A. Multifunctional chair, Patent on useful model' №91269 s priority from 12. 11. 2009.
2. Kholmogorova N.V., Kruchinin P.A., Shlykov V.Yu., Sliva S.S. Diagnostika funktsional'nykh sostoyaniy cheloveka na osnove silokordinatnykh apparatno-programmnykh kompleksov [Diagnostics of functional human's state based on force-coordinated complexes which consist of software and hardware parts], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 9 (110), pp. 170-174.

3. *Kholmogorova N.V., Kruchinin P.A., Levik Yu.S., Sliva S.S. Shlykov V.Yu.* Diagnostika rannikh nevrologicheskikh narusheniy s pomoshch'yu silomomntnykh apparatno-programmnykh kompleksov [Diagnostics of early neurological disorders with hardware and software complexes based on force-torque sensors], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 9 (134), pp. 256-261.
4. *Kruchinin P.A., Lebedev A.V., Kholmogorova N.V.* Osobennosti chastotnogo analiza signalov silomomentnykh datchikov v zadache issledovaniya fiziologicheskogo tremora [Features frequency analysis of signals workspace sensors to the study of physiological tremor], *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki* [Russian journal of biomechanics], 2013, Vol. 17, No. 1, pp. 64-77.
5. *Kruchinin P.A., Kholmogorova N.V., Kruchinina A.P.* Ispol'zovanie komponentov ballistogramm, obuslovlennykh serdechnoy deyatel'nost'yu, pri issledovanii uderzhaniya chelovekom zadannoy pozy [The use of components of bullestorm due to cardiac activity in the study of retention by a person of a given pose], *Inzhenernyy Vestnik Dona* [Journal of Engineering Don], 2012, No. 4 (Part 1).
6. *Breme N., Oggero E., Pagnacco G.* Power spectrum characteristics of physiologic and pathologic tremor, *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 1999, Vol. 1, No. 1, pp. 71-88.
7. *Breme N.* Method for analysis of abnormal body tremors, US Patent N US6, 936,016B2, aug 30, 2005.

Статью рекомендовал к опубликованию к.б.н. О.В. Казенников.

Холмогорова Наталья Владимировна – ФГБОУ ВПО «Московский педагогический государственный университет»; e-mail: natalya_holmogor@mail.ru; 129164, г. Москва, ул. Кибальчича, 6, корп. 4; тел.: +74956820173; кафедра анатомии и физиологии; к.б.н.; доцент.

Кручинин Павел Анатольевич – МГУ им. М.В. Ломоносова; e-mail: pkruch@mech.math.msu.su; 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1; тел.: +74959393383; кафедра прикладной механики и управления; к.ф.-м.н.; доцент.

Шлыков Владимир Юрьевич – Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН; e-mail: shlykov@iitp.ru; 127994, г. Москва, Большой Каретный переулок, 19; тел.: +74956502895; с.н.с.; к.б.н.

Левик Юрий Сергеевич – e-mail: lab9@iitp.ru; зав. лабораторией; д.б.н.

Слива Сергей Семенович – Закрытое акционерное общество «ОКБ “Ритм”»; e-mail: stabilan@okbritm.com.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 99; тел.: +78634623190; начальник отдела.

Писаренко Олег Александрович – e-mail: stabilan@okbritm.com.ru; инженер.

Переяслов Григорий Олегович – e-mail: stabilan@okbritm.com.ru; инженер.

Kholmogorova Natalya Vladimirovna – Moscow State Pedagogical University; e-mail: natalya_holmogor@mail.ru; 6, Kibalchicha street, Moscow, 129164, Russia; phone: +74956820173; the department of anatomy and physiology; cand. of boil. sc.; associate professor.

Kruchinin Pavel Anatolievich. – Lomonosov Moscow State University; e-mail: pkruch@mech.math.msu.su; 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; phone: +74959393383; the department of applied mechanics and control; cand. of phis.-math. sc.; associate professor.

Shlykov Vladimir Yur'evich – Institute for Information Transmission Problems RAS; e-mail: shlykov@iitp.ru; 19, Bolshoy Karetny laine, Moscow, 127994, Russia; phone: +74956502895; senior researcher; cand. of biol. sc.

Levik Yuriy Sergeevich – e-mail: lab9@iitp.ru; laboratory head; dr. of biol. sc.

Sliva Sergey Semenovich – Joint Stock Company «ОКБ “Ритм”»; e-mail: stabilan@okbritm.com.ru; 99, Petrovskaya street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634623190; head of department.

Pisarenko Oleg Alexandrovich – e-mail: stabilan@okbritm.com.ru; engineer.

Pereyaslov Gregory Olegovich – e-mail: stabilan@okbritm.com.ru; engineer.