

Національна академія медичних наук України
Державна установа «Інститут патології хребта та суглобів імені професора
М.І. Ситенка Національної академії медичних наук України»

ЯРЕМИН СТАНІСЛАВ ЮРІЙОВИЧ

УДК: 617.585:616-001.6(045):612.76

**ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ ПЕРЕМІЩЕННЯ
ЗАГАЛЬНОГО ЦЕНТРУ МАС ЛЮДИНИ У ЛЮДЕЙ
ІЗ ЗАХВОРЮВАННЯМИ ПОПЕРЕКОВОГО ВІДДІЛУ ХРЕБТА**

14.01.21 – травматологія та ортопедія

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата медичних наук



Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Вінницькому національному медичному університеті ім. М.І. Пирогова МОЗ України.

Науковий керівник: доктор медичних наук професор
ФІЩЕНКО Володимир Олександрович
Вінницький національний медичний університет
ім. М.І. Пирогова МОЗ України, завідувач
кафедри травматології та ортопедії

Офіційні опоненти: доктор медичних наук професор
ТАНЬКУТ Володимир Олексійович
Державна установа «Інститут патології
хребта та суглобів імені професора М.І. Ситенка
Національної академії медичних наук України»,
головний науковий співробітник відділу
патології суглобів

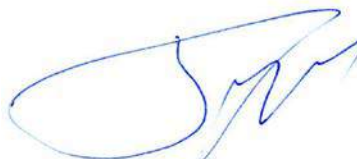
доктор медичних наук професор
СУХІН Юрій Віталійович
Одеський національний медичний університет
МОЗ України, завідувач кафедри травматології
та ортопедії

Захист відбудеться «11» березня 2016 року об 11.30 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.607.01 Державної установи «Інститут патології хребта та суглобів імені професора М.І. Ситенка Національної академії медичних наук України» (61024, м. Харків, вул. Пушкінська, 80).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державної установи «Інститут патології хребта та суглобів імені професора М.І. Ситенка Національної академії медичних наук України» (61024, м. Харків, вул. Пушкінська, 80).

Автореферат розісланий «11» лютого 2016 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
заслужений діяч науки і техніки України
доктор медичних наук професор



В.О. Радченко

Актуальність теми. Дегенеративно-дистрофічні захворювання поперекового відділу хребта є найчастішою патологією серед людей віком понад 50 років та становлять одну з найбільш складних і актуальних проблем сучасної ортопедії. За останні роки поширилися розробки методів консервативного лікування з використанням корсетів, які розвантажують поперековий відділ хребта, але наукових досліджень щодо впливу ортезів та корсетів на опорно-кінематичну функцію вкрай недостатньо (Грунтовский Г.Х., Мителева З.М., 1995; Радченко В.О., 2003). Існують роботи, спрямовані на вивчення впливу лікувальних ортезів та корсетів на утримання людиною вертикальної пози (Мезенцев А.О., 2004; Куценко В.О., 2011).

Дослідження механізмів регуляції пози людини залишається однією з найбільш актуальних задач фізіології руху протягом останніх 50 років (Бернштейн Н.А., 1949; Гурфинкель В.С., 1982, 1999; Ніколаєв Л.П., 1947, 1950; Козирєв Г.С., 1936, 1947; Гуревич Р.А., Тютюнник І.Ф., 1973; Мителева З.М., 1995, 2003). Причина цього полягає як у високій практичній значущості результатів дослідження для розробки методів діагностики та лікування різних порушень функції центральної нервової та опорно-рухової систем, так і в цінних теоретичних результатах, які стосуються загальних принципів організації управління рухами людини.

Одним з найменш досліджених питань регуляції пози є забезпечення спокійного стояння. У відповідь на будь-яке ідентифіковане збудження запускається стереотипна програма його компенсації.

Деякі автори вважають, що основні коливання тіла відповідають порогам чутливості біологічних сенсорів, які містяться в тілі людини, інші – що основні коливання тіла відображають власні коливання моделювальної тіла людини одноланкової біомеханічної системи, яка набуває стабільності через в'язко-пружні властивості м'язів.

Пацієнт з дегенеративно-дистрофічними захворюваннями поперекового відділу хребта для забезпечення вертикальної пози прагне пристосуватися до функціональних або органічних змін опорно-рухової системи аби уникнути чи зменшити больовий синдром. Для керування цим процесом хворий повинен блокувати суглоби активно (скороченням необхідних груп м'язів) або пасивно (перенесенням проекції загального центра мас у фронтальній чи сагітальній площинах). Варіабельність останнього процесу достатньо велика.

За критерії оцінки статограм у ДУ «Інститут патології хребта та суглобів ім. проф. М.І. Ситенка НАМНУ» використовують коефіцієнти хитання та стійкості, максимальне відхилення у фронтальній та сагітальній площинах під час двоножного стояння та з переважним навантаженням однієї кінцівки (Філіпенко В.А., Танькут В.О., 2001). Також було додатково розроблені інші критерії оцінки статограм, таких як оцінка площ статограм, кутові асиметрії, та низка характеристик частот та потужностей сигналу статограми (Грунтовський Г.Х., 1995; Радченко В.О., Мителева З.М., 2003; Мітелєв Д.А., Тяжелов О.А., 2003).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано відповідно до плану науково-дослідних робіт

кафедри травматології та ортопедії Вінницького національного медичного університету імені М.І. Пирогова Міністерства охорони здоров'я України («Комплексна діагностика змін структурно-функціонального стану опорно-рухового апарату у хворих з травмами та дегенеративно-дистрофічними захворюваннями», держреєстрація № 0109U001775. Автор провів патентно-інформаційний пошук, проаналізував наукову літературу, розробив програму досліджень та зібрав матеріал дослідження, виконав анамнестичне та інструментальне обстеження пацієнтів. Згідно з договором про наукову співпрацю між Вінницьким національним медичним університетом імені М.І. Пирогова Міністерства охорони здоров'я України та Державною установою «Інститут патології хребта та суглобів імені професора М.І. Ситенка Національної академії медичних наук України», який передбачав спільне виконання науково-дослідної роботи «Особливості формування траєкторії переміщення загального центра мас людини в процесі підтримки вертикальної пози для діагностики порушень функції опорно-рухової системи», шифр теми ЦФ 2011.4.АМНУ, держреєстрація № 0111U000070. Автором було проаналізовано дійсні фізіологічні моделі підтримки вертикальної пози, розроблені нові методики статографічних досліджень з використанням провокувальних впливів, розроблено діагностичну систему розпізнавання патології у хворих на остеохондроз поперекового відділу хребта й коксартроз).

Мета дослідження: вивчити вплив рухомості сегментів хребта людини в нормі та за умов захворювань поперекового відділу хребта на формування траєкторії переміщення загального центра мас людини в процесі підтримки вертикальної пози.

Задачі дослідження:

1. Розробити концептуальну модель процесу підтримки вертикальної пози людини.
2. Розробити математичну модель та проаналізувати вплив компенсаторно-приспосувальних механізмів організму на результати статографічних досліджень.
3. Розробити математичну модель формування траєкторії переміщення загального центра мас людини як багатоланкового вертикального маятника.
4. Провести дослідження особливостей стояння пацієнтів із захворюваннями поперекового відділу хребта.
5. Вивчити вплив фіксації корсетом поперекового відділу хребта на процес підтримки вертикальної пози в пацієнтів із захворюваннями поперекового відділу хребта.
6. Розробити нові способи оцінювання функції опорно-рухової системи людини.

Об'єкт дослідження – процес формування траєкторії переміщення проекції загального центру мас людини під час стояння.

Предмет дослідження – геометричні та амплітудно-частотні характеристики коливань загального центра мас людини.

Методи дослідження: клінічні, біомеханічні, математичне моделювання, статистичні.

Наукова новизна одержаних результатів. У результаті проведених досліджень отримані нові знання про особливості підтримки вертикальної пози здоровою людиною та пацієнтами із захворюваннями поперекового відділу хребта. Доведено, що в людей із захворюванням поперекового відділу хребта спостерігають зміни параметрів статограми порівняно із статограмою здорової людини, а саме: збільшення розкиду плям проекції загального центру мас та площин плям статограми, значне зростання асиметрії як геометричних, так і енергетичних параметрів плям проекції загального центру мас.

Розроблена та науково підтверджена концепція формування траєкторії переміщення проекції загального центра мас людини на площині опори, як результат роботи багатоланцюгового маятника, кожен ланцюг якого має специфічний вплив на здатність підтримки рівноваги під час вертикального стояння.

Створено концептуальну та математичні моделі впливу компенсаторно-приспосувальних механізмів на підтримку вертикальної пози людини.

Було розроблено нові критерії оцінювання геометрії статограм: площин та їх відношення, коефіцієнтів асиметрії. Кожен параметр був статистично обґрунтований щодо можливості його використання для оцінювання стану опорно-рухової системи хворих на остеохондроз поперекового відділу хребта.

Отримані дані були оброблені статистично за допомогою технології штучних нейронних мереж, що дало можливість виявити у хворих на остеохондроз поперекового відділу хребта ймовірну наявність патології кульшових суглобів.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені нові методи оцінки дозволили підвищити рівень діагностики ушкоджень опорно-рухової системи людини та контролю ефективності лікування пацієнтів із захворюваннями поперекового відділу хребта (патент України № 79681). На клінічних прикладах хворих похилого віку з остеохондрозом поперекового відділу хребта доведено необхідність статографічного дослідження для підбору корсету та контролю перебігу консервативного лікування.

Результати дослідження впроваджені в практику лабораторії біомеханіки ДУ «Інститут патології хребта та суглобів імені професора М.І. Ситенка НАМН України», Вінницької міської клінічної лікарні швидкої медичної допомоги, в учбовий процес кафедри ортопедії та травматології Вінницького національного медичного університету ім. М.І. Пирогова, кафедри травматології та ортопедії Запорізького державного медичного університету МОЗ України.

Особистий внесок здобувача. Дисертантом самостійно проаналізовано наукову літературу та патентну інформацію з питань фізіології підтримки вертикальної пози людини, методів проведення та аналізу результатів статографічних досліджень. Брав участь у розробці концептуальних та математичних моделей. Автором самостійно розроблено програму досліджень, зібрано матеріал дослідження, сформовано групи пацієнтів, виконано їх анамнестичне та інструментальне обстеження. Особисто дисертантом проведено статистичний аналіз результатів дослідження. Спільно з науковим керівником проаналізовані та узагальнені результати дослідження, сформульовані висновки

та практичні рекомендації, забезпечено їх впровадження в медичну практику та відображення в опублікованих працях. Експериментальні біомеханічні дослідження виконані в лабораторії біомеханіки ДУ «Інститут патології хребта та суглобів ім. проф. М.І. Ситенка НАМН України» за консультативної допомоги наукового співробітника М.Ю. Карпінського. Математичне моделювання виконано на кафедрі теоретичної механіки Харківського національного університету ім. Н.М. Каразіна МОН України за консультативної допомоги к. ф.-м. наук Н.М. Кізилової. Участь співавторів відображено в спільних наукових публікаціях.

Апробація результатів дисертації. Результати дослідження повідомлені на Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Сучасні теоретичні та практичні аспекти травматології та ортопедії» (Донецьк, 2012), I Українському симпозиумі з біомеханіки опорно-рухової системи (Дніпропетровськ, 2012), Міжнародній конференції «Современные проблемы математики и ее приложения в естественных науках и информационных технологиях» (Харків, 2012), XVI з'їзді ортопедів-травматологів України (Харків, 2013).

Публікації. Основні положення дисертації опубліковані в 6 наукових працях, з них 5 статей у наукових фахових виданнях, 1 патент України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 7 розділів власних досліджень, висновків, переліку посилань, додатків. Роботу викладено на 170 сторінках машинного тексту, містить 35 таблиць, 36 рисунків. Список використаних джерел містить 130 найменувань (з них 59 кирилицею, 71 латиницею).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Матеріал і методи. Дослідження проводили в ДУ «Інститут патології хребта та суглобів ім. проф. М.І. Ситенка НАМН України» в лабораторії біомеханіки на пристрої «Статограф».

Було обстежено 30 здорових волонтерів-чоловіків (у віці від 25 до 45 років), яким проводили статографічні дослідження на початку (з 9 до 11 години) та наприкінці (з 16 до 18 години) робочого дня. Усім волонтерам виконували стандартні статографічні дослідження.

Клінічні дослідження включали результати статографічних досліджень 10 хворих на остеохондроз поперекового відділу хребта у віці 45-50 років, яким проводили консервативне лікування; 15 хворих на двобічний коксартроз II-III стадії. Ретельно розглянуті хворі похилого віку (70-72 роки) з остеохондрозом поперекового відділу хребта, яких лікували консервативно.

Математичне моделювання впливу компенсаторно-приспосувальних механізмів на результати статографічних досліджень ґрунтується на наявності компенсаторно-приспосувальних реакцій організму в умовах зміни існування. Це призводить до того, що в деяких випадках хворі з наявними патологічними змінами показують результати близькі, а в окремих випадках і відповідні нормі. Математична модель впливу компенсаторно-приспосувальних реакцій організмів будується на простій математичній моделі: $f_n = f_d$. Вона пристосована

перевірити, чи може значення функції визначення положення загального центру мас (ЗЦМ) за патології f_δ (деформована функція) бути тотожним значенню тієї ж функції в нормі f_n (нормована функція).

Експериментально-математична модель тіла людини як багатоланкового маятника була створена на основі стабілографічних досліджень 12 здорових волонтерів у віці $(33,5 \pm 16,5)$ року, вагою $(67,7 \pm 20,8)$ кг, ростом $(1,73 \pm 0,17)$ м. Дослідження проводили за стандартною методикою статографічного дослідження. У всіх волонтерів вимірювали довжину сегментів нижніх кінцівок (гомілки та стегна), а також тулуба і сегментів верхніх кінцівок.

Аналізували дані статограм, які подаються в стандартному протоколі дослідження – коефіцієнт хитання під час двоопорного та однохпорного стояння, а також середні значення координат X та Y за тих же типів стояння.

Спектральний аналіз – метод обробки сигналів, який дозволяє охарактеризувати частотний склад вимірюваного сигналу. Проаналізовані всі доступні точки часової послідовності сигналу. Аналізували чотири максимальні піки сигналу – частоту та потужність кожного піку та загальну потужність, яка припадає на них.

Крім спектральних характеристик послідовностей, аналізували статистику часового ряду – мінімальне та максимальне значення, розкид значень, математичне очікування, стандартне відхилення.

Спектральний аналіз часових послідовностей та їх статистичні характеристики проводили в пакеті AutoSignal for Windows Version 1.6.

Загальні параметри вибірок аналізували методами описової статистики з розрахунком середнього значення, стандартного відхилення та стандартної помилки, мінімального та максимального значень, розкиду вибірки. Під час аналізу матеріалів дослідження для порівняння контрольної і дослідної груп використовували T-тест для незалежних вибірок, коли враховували значення критерію Лівіня для вибору результату тесту для однорідних чи неоднорідних дисперсій. Під час порівняння результатів дослідження однієї групи за різних типів дослідження використовували T-тест для парних вибірок. Під час порівняння результатів досліджень понад трьох груп використовували дисперсійний аналіз (ANOVA) з апостеріорним тестом Дункана з рівнем допустимої похибки 5 %. Для визначення рівня взаємозв'язків використовували кореляційний аналіз за методом Пірсона. Підготовку даних проводили в Excel, наступний аналіз виконували в пакеті для статистичного аналізу IBM SPSS Statistics Version 20.

Моделювання процесів підтримки вертикальної пози. У результаті проведеної роботи розроблена загальна концепція виконання статографічних досліджень для оцінювання функції опорно-рухової системи (ОРС).

Реєстрацію ЗЦМ необхідно проводити у двох варіантах: відображення переміщень проекції ЗЦМ на координатній площині та їх розгортка за часом у фронтальній та сагітальній площинах, тому що кожен з цих методів має власне інформаційне навантаження. Сумісне використання двох методів реєстрації поширює діагностичні можливості статографії.

Основною причиною, яка обмежує можливості метода статографії в діагностиці ОРС, є компенсаторно-приспосувальні реакції організму в змінених умовах існування (зокрема на зміну стану ОРС). Було перевірено ступінь впливу компенсаторно-приспосувальних реакцій організму пацієнта на результати статографічних досліджень на простій математичній моделі: $f_n = f_d$. Тобто перевірити, чи може значення функції визначення положення ЗЦМ за патології f_d (деформована функція) бути тотожним значенню тієї ж функції в нормі f_n (нормована функція).

Доведено, що функція рівноваги людини представляє собою деяку поверхню і має нескінчену множину рішень. Змінення одного або декількох параметрів системи не призводить до невідновних наслідків, а може бути компенсовано незначними змінами інших, при цьому система не обов'язково повертається в початкову робочу точку, а може виходити «найкоротшим шляхом» в будь-яку точку на тотожній поверхні, де рівняння рівноваги має рішення. Дією подібних механізмів можуть пояснюватися «сховані» періоди впродовж багатьох захворювань і компенсаторно-приспосувальні реакції, які дозволяють реалізовувати рухові функції за важких уражень опорно-рухової системи.

Математична модель тіла людини як багатоланкової системи. У процесі підтримки людиною заданої пози окремі сегменти його тіла випробують незначні коливання, які не завжди помітні зором, але можуть бути зареєстровані апаратно. Коливання кутів у колінному і кульшовому суглобах корелюють між собою, що пов'язано з наявністю кінематичних синергій, які підтримують незмінним положення центра мас тіла завдяки контролю положення окремих сегментів – тулуба і кінцівок. Розрахунок спектральної щільності потужності показує, що більша її частина (понад 90 %) припадає на частку низьких частот ($f < 2$ Гц). Задача полягала у виявленні параметрів статограм, які можна використовувати в медичній діагностиці.

На розробленій математичній моделі тіла людини у вигляді багатоланкового вертикального маятника оцінювали параметри хитання.

Спектральний аналіз показав, що в разі штучного зменшення площі опори в експериментах збільшувалася потужність коливань у сагітальній площині до втрати стійкості.

Результати досліджень на запропонованих математичних моделях пояснюють механізми, які беруть участь у підтримці положення тіла та їх можливі зміни за умов патології. Складна динаміка коливання тіла розглядається як результат роботи системи підтримки балансу, який направлений на з'ясування ступеня нестійкості заданого положення шляхом малих відхилень окремих сегментів і оцінювання результуючих зміщень центру мас. Система зворотного зв'язку, яка використовує подібний механізм, є досить ефективною для пацієнтів, оскільки навіть у разі великих амплітуд коливання в обох площинах під час одноопорного стояння жоден з обстежених волонтерів не втратив стійкості.

За даними математичного моделювання була розроблена загальна концепція проведення статографічних досліджень для оцінювання функції ОРС.

Визначені основні напрямки вдосконалення метода статографії для оцінки функції ОРС:

1. Реєстрація ЗЦМ у двох варіантах:
 - розгортка проекції ЗЦМ на площині опори;
 - амплітудно-часова діаграма.

2. Розробка нових діагностичних методик з використанням різних збурювальних впливів, які дозволяють активізувати уражені елементи ОРС, або блокувати компенсаторні механізми, які перешкоджають визначенню захворювань та уражень хребта.

Для виявлення ознак захворювання ОРС на ранній стадії необхідно контролювати якомога більше складових її параметрів. Існує два напрямки рішення цього завдання – екстенсивне, яке передбачає механічне збільшення кількості параметрів, які контролюються шляхом поділення платформи на декілька незалежних площадок вимірювання, та інтенсивне, яке полягає в змушеному виведенні функції за межі тотожної поверхні і подальшому контролі процесу її повернення на цю поверхню. Реалізація першого напрямку передбачає розробку нових вимірювальних приладів, другого – нових методів дослідження, оснований на застосуванні зовнішніх «збурювальних» впливів.

Результати стабілографічних досліджень кількох видів двонопоної вертикальної пози й стояння на одній стопі показали, що вигляд відповідних траєкторій проекції центра мас тіла на горизонтальну площину, амплітуди хитання в сагітальній і фронтальній площинах і середня за часом дослідження проекція суттєво відрізняються в різних здорових волонтерів.

Через неможливість однозначної візуальної оцінки стабілографічних даних велике значення мають математичні методи обробки сигналу. За діагностично значущі параметри були виділені максимальні амплітуди хитання у двох напрямках, відношення амплітуд хитання в разі однонопоного та двонопоного стояння і спектральна щільність сигналу у визначених діапазонах частот, відповідних основним частотам коливання тіла. У випадку однонопоного стояння виникає суттєве (у середньому у два рази) збільшення амплітуди хитання, особливо у фронтальній площині, що пов'язано зі значним зменшенням площі опорної поверхні в цьому напрямку.

У процесі стандартного статографічного дослідження вертикального стояння отримуємо низку параметрів опороздатності людини в разі двонопоного стояння та стояння з переважною опорою на одну кінцівку – коефіцієнта хитання, навантаження та стійкості, зміщення координат X та Y за кожного типу стояння.

Аналіз геометричних параметрів статографічного сигналу. Часовий ряд статограми може дати багато інформації щодо геометричних параметрів проекції ЗЦМ на площу опори. Використовуючи тільки три статистичних параметри ряду – математичне очікування (МО), мінімальне та максимальне значення координат – розроблено алгоритм аналізу статограми, який передбачає аналіз геометрії статограми та їх кутові параметри.

Аналіз площин статограми. Визначимо параметри плями ЗЦМ (рис. 1, а): розкид координат по осям X та Y – ΔX та ΔY відповідно, які

визначають розмір плями у фронтальній та сагітальній площинах, площа плями $S = \Delta X \times \Delta Y$, відповідно для двохопрного та одноопрного стояння – S_1, S_2, S_3 .

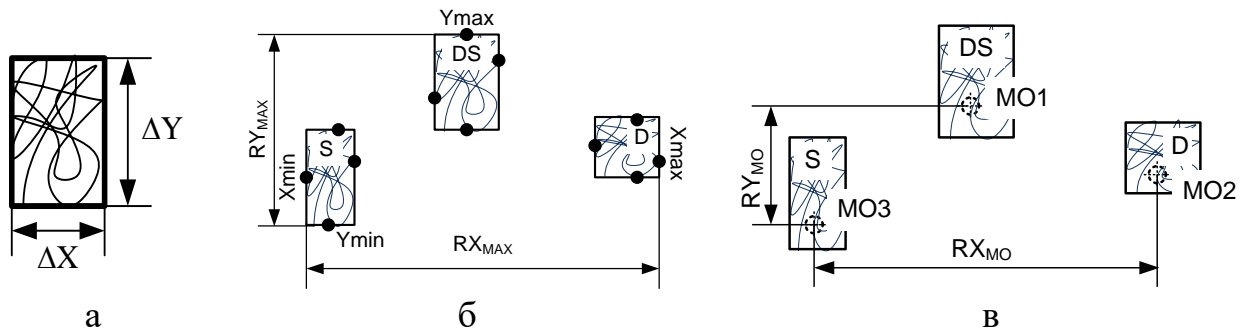


Рис. 1. Параметри статограми для визначення: а) площі плями ЗЦМ для двохопрного та одноопрного стояння; б) загальної площі статорами; в) площі за значеннями МО.

Аналіз геометрії розкиду та асиметрії. Для виявлення меж патологічної асиметрії вводимо, окрім даних мінімальних та максимальних координат, значення МО координати та розраховуємо параметри асиметрії плям статограми у фронтальній (по осі X) та сагітальній (по осі Y) площинах.

Зміщення МО проєкції ЗЦМ у разі одноопрного стояння відносно МО двохопрного стояння. Розраховується як відстань між МО двохопрного стояння та одноопрного ($RX_{12}, RX_{13}, RY_{12}, RY_{13}$) по осям X та Y, відповідно (рис. 2).

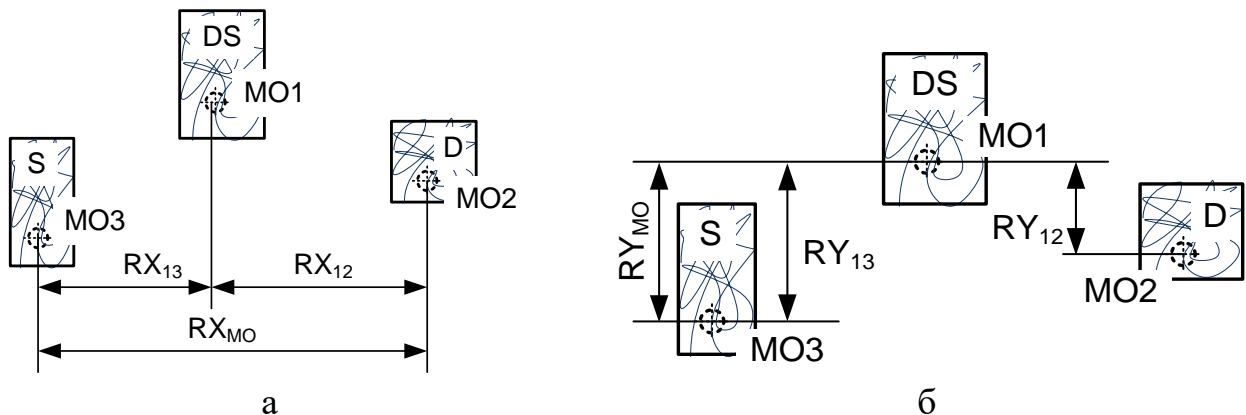


Рис. 2. Параметри статограми для визначення розкиду МО координат ЗЦМ одноопрного стояння та коефіцієнту асиметрії у фронтальній (а) та сагітальній площинах (б).

Асиметрія проєкції ЗЦМ у разі одноопрного стояння визначається як відношення зміщення ЗЦМ правої кінцівки до ЗЦМ лівої кінцівки. Коефіцієнт відношення розкиду статорами по осі X до розкиду по осі Y визначається як відношення розкиду по осі X до розкиду по осі Y за значеннями по математичному очікуванню координат X та Y відповідно.

Фізичний сенс кутової асиметрії полягає у відношенні величини кутів, які утворені осьовою лінією по МО осі Y двохопрного стояння, МО координат (X, Y) двохопрного стояння, та МО (X, Y) координат проєкції ЗЦМ одноопрного

стояння (рис. 3). Кут розвороту тіла визначається за трикутником, який утворений відрізком між МО (X, Y) одноопорного стояння та горизонтальною лінією, що будується по осі X з точки максимального МО координати Y одноопорного стояння (рис. 3, б).

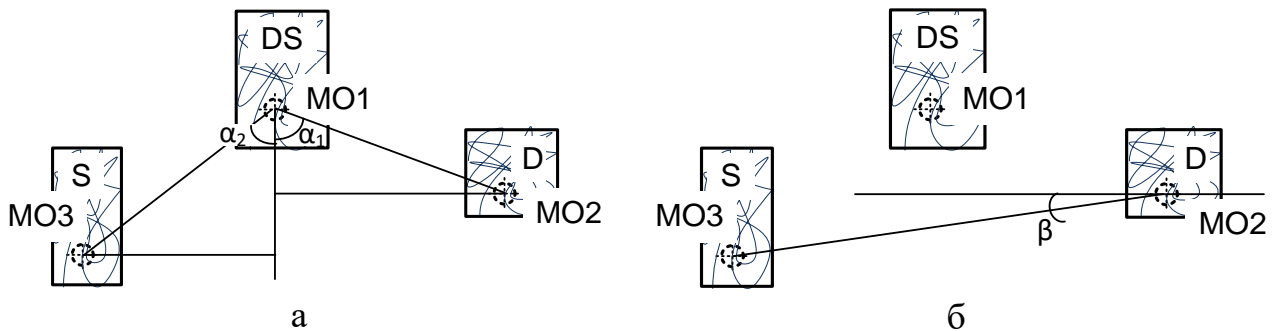


Рис. 3. Параметри стадиограми для визначення: а) коефіцієнту кутової асиметрії; б) кута розвороту тіла.

Енергетичний аналіз стадиограм. Визначали енергетичні параметри: для кожного піка – його частоту, потужність та частку енергії, яка припадає на пік; сумарну енергію сигналу. Зі статистичних параметрів сигналу визначали мінімальне, максимальне, середнє значення сигналу та його стандартне відхилення, розкид значень. Отримані дані були оброблені статистично.

На підставі проведеного концептуального моделювання та попередніх експериментальних досліджень розроблений новий спосіб оцінювання функціонального стану ОРС людини, який дозволяє здійснювати пряму і диференційну оцінку стану кожного із елементів парних сегментів зазначеної системи і зменшити на підставі цього витрати часу та коштів, а також підвищити достовірність цієї оцінки.

Поставлене завдання вирішується тим, що в способі оцінювання функціонального стану опорно-рухової системи людини, заснованому на вимірюванні її антропометричних параметрів (ваги, довжини кожного сегменту системи, а також зросту), розрахунку на підставі цього вимірювання амплітуди і частоти власних коливань кожного сегмента і порівнянні з використанням комп'ютерно-програмного комплексу характеристик зазначених коливань з фактичними коливаннями сегментів, додатково розміщують маркери на кожному із елементів парних досліджуваних сегментів і здійснюють відеозйомку зазначених маркерів зі швидкістю 15-25 кадрів за секунду упродовж не менш ніж 30 с, будують криві переміщення маркерів у системі координат «мм/с» з перетворенням їх в амплітудно-частотні характеристики власних коливань сегментів, визначають максимальні величини амплітуд цих коливань і в разі збільшення зазначених амплітуд більш ніж на 30 % від розрахункових діагностують патологію конкретного парного елемента опорно-рухової системи.

За описаною методикою оцінювання функціонального стану опорно-рухової системи обстежено понад ста пацієнтів. Встановлено, що достовірність оцінювання зазначеного стану окремих сегментів та їх елементів коливається в

межах 0,92-0,97 залежно від точності вимірювання антропометричних параметрів пацієнтів.

Вивчення впливу стомлюваності на параметри статограм у здорової людини показало, що упродовж дня накопичується стомлюваність, що призводить до втрати координаційних та фізичних спроможностей. Ці зміни відображуються на статограмах зміною геометричних параметрів та енергетичних складових.

На початку дня в більшості волонтерів ЗЦМ припадає на зону, розташовану поблизу центру координат, і розкид значень ЗЦМ не значний, наприкінці робочого дня розкид ЗЦМ збільшується, особливо в сагітальній площині. Але статистично значущої різниці не виявлено.

Аналіз енергетичних параметрів статограм волонтерів не встановив помітних змін частот, на які припадають піки з максимальною потужністю, але потужність самих піків статограми наприкінці робочого дня помітно зростала, особливо у фронтальній площині – вдвічі.

Доведено, що час дослідження має значення, і стомлюваність може впливати на характер стояння, енергетику, яку витрачає для підтримки рівноваги людина. Особливо це стосується дослідження хворих, які витрачають на підтримку рівноваги значно більше енергії, ніж здорова людина.

Вивчення особливостей статограми у хворих на остеохондроз поперекового відділу хребта без корсету та в корсеті. Обстежено хворих на остеохондроз поперекового відділу хребта. У більшості пацієнтів діагностовано одну чи більше гриж міжхребцевого диска на рівні L_{III}...S_I, спондилоартроз, у деяких – спондилолітез I-II ступеня, стеноз на рівні поперекового відділу хребта. Пацієнти були переважно віком від 35 до 50 років, нормальної статури, без важких супутніх захворювань. Пересувалися самостійно без додаткової опори. Усіх пацієнтів не лікували хірургічно, деякі з них проходили на час дослідження чи раніше курс консервативного лікування, усім пацієнтам рекомендована корсетотерапія.

Використання корсету мало впливало на характер статограм двохопного стояння, в разі одноопного стояння спостерігали збільшення енергетичних витрат за умов стояння в корсеті в обох площинах.

Виявлений дуже великий розкид значень потужностей піків спектру статограм – від 1,58 до 1650 дБ. Це пояснюється тим, що підтримка рівноваги для кожної людини потребує різних енергетичних витрат, які залежать і від терміну захворювання, і від наявності болю (локального, чи який іррадіює в кінцівку), і від зручності корсета.

Фіксація поперекового відділу хребта виключає з механізму підтримки рівноваги людини низку суглобів, які розташовані в центрі біомеханічної системи, і таким чином практично виключають коливання тіла у фронтальній площині, а для підтримки рівноваги залишаються лише рухи в сагітальній площині, теж значно обмежені, і тому відмічається зростання витрат енергії підтримки рівноваги через зменшення амплітуди фізіологічного коливання тіла. Великий розкид параметрів може свідчити про те, що для призначення корсетотерапії потрібен індивідуальний підхід, який враховував би не тільки

патологічні зміни в поперековому відділі хребта, а й особливості флексії тіла (якщо вона спостерігається), патологію кульшових суглобів, больовий синдром тощо.

Вивчення особливостей статограм у хворих із двобічною патологією кульшових суглобів. Обстежили групу хворих, у яких разом із остеохондрозом поперекового відділу хребта діагностували патологію кульшових суглобів (асептичний некроз головки стегнової кістки або коксартроз). Часто захворювання кульшових суглобів та поперекового відділу хребта у таких хворих має дегенеративний характер та перебігає повільно і набуває свого розвитку в достатньо похилому віці. Для уникання больового синдрому в цих хворих змінюється вертикальна постава, ходити їм легше в стані легкої флексії тулуба, особливо, якщо дегенеративний процес супроводжується спондилолітезом. Природне зменшення щільності кісткової тканини суглобів під впливом тривалого неправильного навантаження змінює форму головок стегнових кісток та зони навантаження.

Проаналізовані енергетичні витрати для підтримки вертикального стояння у хворих із двобічною патологією кульшових суглобів. Аналіз спектральних характеристики статограм хворих на двобічний коксартроз показав, що в разі двоножного стояння основна потужність статограми припадає на сагітальну площину, тобто хворі з коксартрозом виконують рухи переважно в сагітальній площині, що підтверджує те, що в разі двоножного стояння потужність спектру у фронтальній площині становить $(197,19 \pm 178,88)$ дБ, а у сагітальній $(383,53 \pm 271,55)$ дБ, причому максимум сумарної потужності спектру по осі Y становив 1027,94 дБ. У випадку одноножного стояння у фронтальній площині потужність спектру зростала до $(236,38 \pm 194,24)$ дБ з максимумом 860,45 дБ, а в сагітальній – до $(404,49 \pm 412,85)$ дБ із зафіксованим максимумом 2127,99 дБ.

Такий характер розподілу потужності спектру пояснюється больовим синдромом та обмеженістю рухів привідних м'язів стегна. Порівняння спектральних параметрів статограм хворих на остеохондроз та коксартроз з волонтерами контрольної групи дає можливість оцінити ступінь різниці енергетичних параметрів статограми за різних видів ортопедичних захворювань, виявити більш інформативні параметри статограми.

Порівняльний аналіз не виявив статистично значущої різниці між енергетичними параметрами статограм волонтерів і хворих на остеохондроз у корсеті та без нього. Для хворих на остеохондроз, досліджених без корсета, відмічали помітне зростання енергетичних витрат на підтримку рівноваги під час двоножного стояння, особливо в сагітальній площині (на $(-62,00 \pm 49,00)$ дБ), про що свідчить відмінне значення різниці середніх вибірок. Під час одноножного стояння спостерігали незначне (у межах похибки) зменшення енергетики спектру (на $(5,11 \pm 9,58)$ дБ) у фронтальній площині і (на $(10,67 \pm 13,34)$ дБ) в сагітальній.

Порівняння енергетичних витрат волонтерів і хворих на остеохондроз, обстежених у корсеті, показав збільшення енергетики спектру за всіма параметрами, особливо у сагітальній площині в разі двоножного стояння (на

(50,59 ± 29,90) дБ) і у фронтальній площині за умов одноопорного стояння (на (50,08 ± 28,92) дБ). Таким чином, виникнення високоенергетичних спектрів статограми за умов двохопорного стояння може бути ознакою захворювань поперекового відділу хребта, якщо дослідження хворого проводитимуть без корсета.

У хворих на коксартроз спостерігали статистично значуще ($p < 0,01$) збільшення енергетики спектральних складових для підтримки рівноваги, причому за умов двохопорного і одноопорного стояння. Максимальне збільшення зафіксовано в сагітальній площині (на (87,73 ± 26,14) дБ у разі двохопорного стояння та на (85,38 ± 24,43) дБ – за одноопорного).

У фронтальній площині відмічено значне збільшення потужності спектру (на (60,51 ± 13,44) дБ у разі двохопорного стояння і на (45,35 ± 12,75) дБ – за одноопорного).

Аналіз виявив, що енергетичні параметри статограми у хворих на коксартроз статистично значущо більші, ніж в інших групах, особливо це помітно за умов двохопорного стояння у фронтальній площині та в разі одноопорного – в сагітальній.

Аналіз геометричних параметрів статограм у пацієнтів із патологією ОРС. З метою оцінити залежність загальної потужності спектру плями статограми і площі, яка є інтегральним показником розкиду розмірів плями у фронтальній та сагітальній площинах, та їх зв'язок з енергетичними параметрами спектру проведений кореляційний аналіз загальної потужності плями статограми та її площі. Виявлено, що площа плями проекції ЗЦМ високо значуще ($r = 0,8$; $p < 0,001$) корелює з сумарною потужністю спектру. Потужність спектру пропорційна щільності сигналу, тобто швидкості зміни напрямку сигналу, чим для статографічного сигналу може бути швидкість переміщення ЗЦМ, або частота високоамплітудних рухів.

Аналіз геометричних та спектральних характеристик стояння показав, що збільшення енергетичних параметрів спектру у фронтальній площині за умов двохопорного стояння і в сагітальній площині за одноопорного дає змогу передбачити наявність патології кульшового суглоба, поки не доведено інше. Також були виявлені параметри, корисні для визначення переважної патології у хворих. Мали високу чутливість значення площини плями ЗЦМ за одноопорного стояння (S_2 , S_3), коефіцієнти відношення площин (K_{SS} та $K_{\Sigma S}$), коефіцієнт кутової асиметрії ($K\alpha$).

Систему автоматизованого аналізу статографічних досліджень запропоновано на основі штучної нейронної мережі. За входні аргументи обрано 20 параметрів спектральних та геометричних характеристик статограми.

Побудована нейронна мережа показала достатньо високий результат у визначенні діагнозу. Найбільшу чутливість і специфічність нейронна мережа має для визначення коксартрозу, для цього захворювання у 95 % випадків прогноз буде вірним, з меншою чутливістю та специфічністю мережа працює для визначення остеохондрозу – 82 % випадків.

Клінічна апробація розроблених методик. Досліджено статограми 3 хворих похилого віку (70-72 роки), які на час обстеження проходили

консервативне лікування. Враховуючи похилий вік хворих для зменшення больового синдрому призначали напівжорсткий корсет. Аналіз статограм проведено за повним алгоритмом. Встановлено, що призначення корсету призводить до напруження м'язів за умов одноопорного стояння з появою ознак патологічного стану кульшових суглобів.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено концептуальну модель процесу підтримки вертикальної пози людини як роботи системи автоматизованого керування та обґрунтовано загальний напрямок удосконалення методів проведення статографічних досліджень для оцінювання функції ОРС, а саме: реєстрація ЗЦМ з розгорткою проекції ЗЦМ на площині опори та визначенням амплітудно-часових діаграм; використанням різних збурювальних впливів, які дозволяють активізувати уражені елементи ОРС, або блокувати компенсаторні механізми, які перешкоджають визначенню захворювань та уражень хребта.

2. Розроблено математичну модель впливу компенсаторно-приспосувальних механізмів організму на результати статографічних досліджень. Показано, що зміна одного або декількох параметрів системи підтримки рівноваги не призводить до невідновних наслідків, а може компенсуватися змінами інших, що сприяє збереженню рівноваги, але завдяки іншим механізмам компенсації.

3. Розроблено математичну модель стояння людини як багатоланкового вертикального маятника, яка дозволяє розраховувати коливання сегментів тіла під час аналізу траєкторії переміщення загального центру мас людини.

4. Статистичний аналіз розроблених геометричних параметрів статограми виявив значущу їх різницю ($p < 0,05$) у хворих на коксартроз порівняно із хворими на остеохондроз та здоровими волонтерами, особливо в разі одноопорного стояння.

5. Для визначення супутньої патології кульшових суглобів у хворих на остеохондроз використана методика штучної нейронної мережі. Точність діагностики – 70 % вірних відповідей, 20 % неточних та 10 % невірних. Метод підтвердив свою роботоспроможність і може бути використаний для визначення супутньої патології у хворих на остеохондроз поперекового відділу хребта.

6. Обґрунтовано можливість використання параметрів статографічного дослідження для визначення правильного призначення корсетів у хворих на остеохондроз поперекового відділу хребта та контроль за перебігом консервативного лікування таких хворих.

ПЕРЕЛІК РОБІТ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Тяжелов А.А. Анализ стабилограмм на основе математической модели тела человека, как многозвенной системы / А.А. Тяжелов, Н.Н. Кизилова., М.Ю. Карпинский, В.А. Фищенко, **С.Ю. Яремин**, Е.Д. Карпинская // Травма. – 2012. – Т. 13, № 4. – С. 17-25.

Автором проведено обстеження волонтерів та попередня статистична обробка одержаних результатів.

2. Тяжелов О.А. Особливості динамічних характеристик статограм при фіксації суглобів нижньої кінцівки / О.А. Тяжелов, М.Ю. Карпінський, О.Д. Карпінська, **С.Ю. Яремін** // Травма. – 2014. – Т. 15, № 2. – С. 88-93.

Автор брав участь в обстеженні волонтерів, статистичній обробці отриманих даних, узагальненні результатів дослідження.

3. Тяжелов О.А. Обґрунтування та аналіз геометричних параметрів статограм для оцінювання стану опорно-рухової системи людини / О.А. Тяжелов, М.Ю. Карпінський, О.Д. Карпінська, **С.Ю. Яремін** // Ортопедия, травматология и протезирование. – 2014. – № 3 (596). – С. 62-68.

Автор брав участь у дослідженні волонтерів, розробив та статистично перевіряв нові геометричні параметри статограм.

4. Тяжелов О.А. Метод автоматизованої диференційної діагностики патології опорно-рухової системи людини на підставі статографічних досліджень / О.А. Тяжелов, М.Ю. Карпінський, О.Д. Карпінська, **С.Ю. Яремін** // Травма. – 2014. – Т. 15, № 6. – С. 88-93.

Автор брав участь в обстеженні хворих, статистичній обробці отриманих даних, запропонував алгоритм автоматизованого аналізу статографічної інформації.

5. Тяжелов О.А. Моделювання процесів підтримки вертикальної пози / О.А. Тяжелов, В.О. Фіщенко, **С.Ю. Яремін**, М.Ю. Карпінський, О.Д. Карпінська // Ортопедия, травматология и протезирование. – 2015. – № 1 (598). – С. 42-49.

Автор самостійно проаналізував наявні фізіологічні моделі підтримки вертикальної пози людини та на їх основі запропонував концептуальну модель.

6. Пат. 79681 Україна. МПК (2006.01) А61В5/103, А61В5/107. Спосіб оцінки функціонального стану опорно-рухової системи людини / М.Ю. Карпінський, О.Д. Карпінська, Н.М. Кізілова, О.А. Тяжелов, **С.Ю. Яремін**, О.Є. Вирва; заявник та патентовласник ДУ «Інститут патології хребта та суглобів імені професора М.І. Ситенка АМН України». – № u201213188; заяв. 19.11.2012; опуб. 25.04.2013, Бюл. № 8.

Автором було розроблено спосіб реєстрації рухів людини в процесі статографічного дослідження.

АНОТАЦІЯ

Яремін С.Ю. Особливості формування траєкторії переміщення загального центру мас людини у людей із захворюваннями поперекового відділу хребта. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата медичних наук за спеціальністю 14.01.21 – травматологія та ортопедія. – Державна установа «Інститут патології хребта та суглобів імені професора М.І. Ситенка Національної академії медичних наук України», Харків, 2016.

Дисертація присвячена дослідженню механізмів регуляції пози в процесі забезпечення спокійного стояння та особливостям організації системи регуляції пози у відповідь на будь-яке ідентифіковане збудження та особливостям вертикального стояння за умов захворювань поперекового відділу хребта (остеохондроз) та кульшових суглобів (коксартроз).

Розроблено концептуальну модель процесу підтримки вертикальної пози людини як роботи системи автоматизованого керування. Обґрунтовано методи проведення статографічних досліджень з визначенням амплітудно-часових параметрів статограми. Розроблено математичну модель впливу компенсаторно-приспосувальних механізмів організму на результати статографічних досліджень та доведено, що зміна декількох параметрів системи підтримки рівноваги компенсується іншими механізмами системи. Розроблено математичну модель стояння людини як багатоланкового вертикального маятника, яка дозволяє розраховувати коливання сегментів тіла під час аналізу траєкторії переміщення загального центру мас. Статистичний аналіз розроблених геометричних параметрів статограми виявив значущу різницю у хворих на коксартроз порівняно із пацієнтами з остеохондрозом та здоровими волонтерами. Для визначення супутньої патології кульшових суглобів у хворих на остеохондроз запропонована штучна нейронна мережа, точність якої склала 70 %. Обґрунтовано можливість використання параметрів статографічного дослідження для адекватного призначення корсетів хворим на остеохондроз поперекового відділу хребта та контролю за перебігом консервативного лікування таких пацієнтів.

Ключові слова: загальний центр мас, збурювальні впливи, статографія, штучна нейронна мережа.

АННОТАЦИЯ

Яремин С.Ю. Особенности формирования траектории перемещения общего центра масс человека у людей с заболеваниями поясничного отдела позвоночника. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата медицинских наук по специальности 14.01.21 – травматология и ортопедия. – Государственное учреждение «Институт патологии позвоночника и суставов имени профессора М.И. Ситенко Национальной академии медицинских наук Украины», Харьков, 2016.

Диссертация посвящена исследованию механизмов регуляции позы при обеспечении спокойного стояния, особенностей организации системы регуляции позы в ответ на любое идентифицировано возбуждения и вертикального стояния при дегенеративных заболеваниях поясничного отдела позвоночника (остеохондроз) и тазобедренных суставов (коксартроз).

Проведены исследования влияния замыкания ортезами суставов нижних конечностей на показатели вертикального стояния. На основе этого разработан алгоритм проведения статографического обследования и обработки полученной информации.

В результате проведенной работы разработана концептуальная модель процесса поддержания вертикальной позы человека как работы системы автоматизированного управления и обосновано общее направление совершенствования методов статографических исследований при оценке функции опорно-двигательной системы, а именно: регистрация общего центра масс с разверткой его проекции на плоскости опоры и определения амплитудно-временных диаграмм; использованием различных возмущающих воздействий, которые позволяют активизировать пораженные элементы опорно-двигательной системы или блокировать компенсаторные механизмы, препятствующие определению заболеваний и повреждений позвоночника.

Разработана математическая модель влияния компенсаторно-приспособительных механизмов организма на результаты статографических исследований. Показано, что изменение одного или нескольких параметров системы поддержания равновесия не ведет к невозполнимым последствиям, а может компенсироваться за счет других механизмов.

Разработана математическая модель стояния человека как многозвенного вертикального маятника, которая позволяет рассчитывать колебания сегментов тела при анализе траектории перемещения общего центра масс человека.

Были разработаны и статистически обоснованы новые параметры статограмм, оценивающие площади статограммы, коэффициенты отношений площадей при разных видах опоры (двухопорное и при преимущественной опоре на одну конечность), параметры размахов координат при одноопорном стоянии во фронтальной и сагиттальной площадях, коэффициенты асимметрии площадей видов стояния, коэффициенты отношений общей площади статограммы к площади по значениям математического ожидания координат,

коэффициенты размахов статограммы, параметры геометрического отношения размеров проекции статограмм как при отдельных видах стояния, так и общей статограммы, углы разворота тела при одноопорном стоянии и отношение углов разворота тела при преимущественной опоре на одну конечность в сравнении с положением тела при двухопорном стоянии.

В работе широко рассмотрены энергетические и частотно-временные параметры статограмм волонтеров при разных способах фиксации суставов нижних конечностей, а также у больных остеохондрозом и коксартрозом.

Статистический анализ разработанных геометрических и предложенных частотно-временных параметров статограмм обнаружил значимую их разницу ($p < 0,05$) у больных коксартрозом по сравнению с пациентами с остеохондрозом и здоровыми волонтерами, особенно при одноопорном стоянии.

Полученные данные показали высокую специфичность относительно возможности их использования для диагностики патологии позвоночника и тазобедренного сустава. На основе этого для определения сопутствующей патологии тазобедренного сустава у больных остеохондрозом была предложена и успешно апробирована методика искусственной нейронной сети. Точность диагностики – 70 % верных ответов, 20 % неточных и 10 % неверных. Метод подтвердил свою работоспособность и может быть использован для определения сопутствующей патологии у больных остеохондрозом поясничного отдела позвоночника.

Проанализированы результаты обследования 3 больных пожилого возраста (70-72 лет), которые на момент обследования лечились консервативно. Учитывая пожилой возраст больных и наличие противопоказаний к хирургическому лечению, для уменьшения болевого синдрома рекомендовано использование полужесткого корсета. Анализ статограмм проводили по полному алгоритму, предложенному и обоснованному в работе. Было доказано, что назначение корсета приводит к напряжению мышц при одноопорном стоянии с появлением признаков патологического состояния тазобедренных суставов. В связи с этим обоснована возможность использования параметров статографического исследования для определения адекватного назначения корсетов у больных с остеохондрозом поясничного отдела позвоночника и контроля за ходом консервативного лечения таких больных.

Ключевые слова: общий центр масс, возмущающие воздействия, статография, искусственная нейронная сеть.

ABSTRACT

Iaremyn S.Y. Features of formation movement trajectory common center of mass human in people with the diseases of the lumbar spine. – The manuscript.

The dissertation for the scientific degree of the candidate of Medical Sciences in specialty 14.01.21 – Traumatology and Orthopedics. – SI «Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Kharkiv, 2016.

This research focuses on mechanisms of regulation while ensuring a relaxing postures of standing and features of the system poses lyatsiyi-regulated in response to any identified excitement and features vertical standing in diseases of the lumbar spine (low back pain) and diseases of the hip (coxarthrosis).

The conceptual model of postural rights as automated management of the system. Statograph grounded methods of research the definition of amplitude-time parameters statogram. The mathematical model of the impact of compensatory-adaptive mechanisms of the organism statograph the results of studies that prove that change several system parameters support the balance offset other mechanisms of the system. The mathematical model standing man as multi-tier vertical pendulum that allows you to calculate the oscillation body segments in the analysis of the trajectory of movement of the common center of mass. Statistical analysis developed statogram geometrical parameters showed significant difference in patients with coxarthrosis compared to patients with low back pain and healthy volunteers. To determine comorbidity hip joints in patients with low back pain was proposed artificial neural network, whose accuracy was 70 %. The possibility to use options statograph study to determine the correct destination corsets in patients with lumbar osteochondrosis and control the course of conservative treatment of such patients.

Key words: common center of mass, disturbings onshore impacts statografy, artificial neuron network.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ЗЦМ – загальний центр мас
МО – математичне оцінювання
ОРС – опорно-рухова система