

На правах рукописи



Мошкова Анастасия Алексеевна

БИОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БОЛЕЗНИ  
ПАРКИНСОНА ПО ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЮ ЛИЦА И ДВИГАТЕЛЬНОЙ  
АКТИВНОСТИ РУК

Специальность 05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского  
назначения

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Самородов Андрей Владимирович**,  
кандидат технических наук, доцент.

Официальные оппоненты: **Обухов Юрий Владимирович**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, главный научный сотрудник;  
**Садыкова Елена Владимировна**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», профессор кафедры биотехнических систем.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», г. Москва, г. Зеленоград

Защита состоится «30» июня 2021 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.24 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана в зале Ученого Совета по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.24.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н., доцент



Самородов Андрей  
Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Болезнь Паркинсона (БП) – неврологическое заболевание, связанное с дегенерацией дофаминовых нейронов (Samii A., 2004) и занимающее второе место по распространенности среди нейродегенеративных заболеваний (de Lau L. M., 2006). Распространенность БП составляет от 120 до 180 человек на 100 тысяч населения; для лиц старше 60 лет она достигает 1 %, а в категории лиц старше 85 лет – превышает 2 % (Байрамукова А.М., 2013). Несмотря на преимущественную распространенность БП среди пожилого населения, возраст дебюта данного заболевания снижается. Уже сейчас каждый десятый пациент с БП имеет возраст до 50 лет, а каждый двадцатый – до 40 лет (Иллариошкин С.Н., 2011). Данная тенденция, наряду с ожидаемым, согласно исследованиям ООН, увеличением численности пожилого населения в мире (до 22 % к 2050 году), приведет к существенному росту в ближайшие десятилетия числа пациентов с БП.

БП является неизлечимым заболеванием, однако своевременно назначенная терапия способствует поддержанию нормального качества жизни пациента и отодвигает процесс инвалидизации (Голубев В.Л., 1999). Одним из факторов несвоевременной диагностики БП является поздняя обращаемость пациентов к специалисту (Катунина А.Е., 2011); наряду с несвоевременным выявлением симптомов заболевания, только 42 % пациентов обращаются непосредственно к неврологу (Евтушенко С.К., 2014). Постановка диагноза заболевания в настоящее время выполняется только при появлении у пациента соответствующей клинической картины, включающей гипокинезию, тремор, ригидность, постуральную неустойчивость (Левин О.С., 2015). Известно, что облигатным симптомом БП является гипокинезия, которая представляет собой уменьшение амплитуды движений, замедление движений, а также уменьшение их количества. Оценка степени двигательных нарушений проводится неврологом визуально, согласно 3-й части унифицированной шкалы оценки болезни Паркинсона (MDS-UPDRS) (Goetz, C. G., 2008). При амбулаторном обследовании пациент выполняет специальные двигательные упражнения, которые оцениваются неврологом по пятибалльной шкале по степени трудности выполнения упражнений. Известно, что клинические показатели такой оценки вирируются между экспертами (Richards M., 1994; Evers L.J.W., 2019), что говорит о субъективности шкалы MDS-UPDRS. Показатели оценки MDS-UPDRS дают лишь интегральное представление о двигательном нарушении, не раскрывают полную картину изменений отдельных компонент движения, а сама процедура обследования занимает продолжительное время (Московко С.П., 2008).

В настоящее время существует большое число исследований, посвященных автоматизации оценки двигательных нарушений, возникающих в разных локализациях при гипокинезии (Giovanni A., 2019, Butt A.H., 2018, Maachi I.E., 2020, Vinokurov N., 2015). Создан ряд автоматизированных систем, предназначенных для оценки признаков БП в целом (Sahyoun A., 2016,

Langevin R., 2019) и для распознавания БП по отдельным проявлениям гипокинезии, включающим нарушения двигательной активности рук (ДАР), мимики, почерка, речи, походки и другие. Тем не менее, публикуемые результаты получены преимущественно на закрытых и ограниченных по объему базах данных, авторы не предоставляют доступ к разработанному программному обеспечению, предназначенному, в первую очередь, для научных исследований.

Анализ работ в области автоматизации оценки двигательных нарушений с учетом возможности проведения дистанционной оценки в том числе, в домашних условиях, показывает, что наиболее перспективными для оценки гипокинезии локализациями являются руки и лицо. Разработка и верификация методов количественной оценки нарушений движения в данных локализациях с построением системы автоматизированного распознавания БП является актуальной задачей.

**Цель диссертационной работы:** разработка метода автоматизированного распознавания болезни Паркинсона по признакам гипокинезии, включающим количественные характеристики двигательной активности рук и мимики.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Провести анализ подходов к оценке гипокинезии на основе двигательной активности рук и мимики; сформировать вектор признаков для распознавания болезни Паркинсона.

2. Определить предельные возможности решения задачи распознавания болезни Паркинсона по признакам двигательной активности рук и мимики в зависимости от набора признаков и алгоритма классификации.

3. Разработать алгоритм автоматизированной обработки регистрируемых данных двигательной активности рук и мимики.

4. Разработать экспериментальный образец биотехнической системы для исследования болезни Паркинсона по видеоизображению лица и двигательной активности рук и провести его апробацию.

**Научная новизна работы:**

1. Сформирован вектор информативных для распознавания БП некоррелированных признаков. Установлено, что повышение точности распознавания БП достигается при одновременном использовании признаков ДАР и мимики, описываемой признаками мимической активности (МА) и лицевой выразительности (ЛВ), и применении наивного байесовского классификатора. Использование признаков ДАР и мимики по-отдельности приводит к снижению точности распознавания БП на однородной выборке на величину от 3 до 6 %.

2. Сформулированы требования по допустимым погрешностям оценки отобранных характеристик ДАР, МА и ЛВ, обеспечивающие сохранение достигнутых значений точности распознавания БП: для характеристик ДАР допустимые погрешности составляют 6,6 %, для МА – 8,8 %, для ЛВ – 12,9 %.

3. Экспериментально показано, что признаки ДАР, характеризующие выполнение испытуемым трех двигательных упражнений по MDS-UPDRS, не являются устойчивыми к тестовой выборке по сравнению с мимическими

признаками и объединенным вектором признаков, и не могут быть независимо использованы для распознавания БП на практике.

4. Разработан новый метод автоматизированного распознавания БП по видеоизображению лица и ДАР, основанный на построении сигналов движения в процессе выполнения испытуемым специальных упражнений на ДАР и мимику, автоматизированном расчете 14 признаков, характеризующих ДАР, МА и ЛВ и применении наивного байесовского классификатора, обеспечивающий на исследованной выборке точность распознавания БП 93,6 %.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Определены количественные характеристики ДАР и мимики, имеющие статистически значимые различия между группой пациентов с БП и контрольной группой. Сформированы требования к допустимой погрешности их оценки.

2. Установлены наиболее информативные для распознавания БП упражнения для оценки мимической активности: «улыбнуться с усилием», «сдвинуть брови» – и для оценки лицевой выразительности: имитация 4-х базовых эмоций (отвращение, радость, печаль, удивление), изображенных на предъявляемых испытуемому фотографиях. Показано, что использование признаков мимики независимо или совместно с признаками ДАР обеспечивает устойчивость результатов распознавания БП к тестовой выборке.

3. На основании теоретических и экспериментальных исследований разработан аппаратно-программный комплекс для бесконтактного сбора данных и автоматизированного анализа видеоизображения лица и ДАР, обеспечивающий распознавание БП на основе совместной количественной оценки нарушений ДАР и мимики.

#### **Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Сформированный вектор информативных для распознавания БП признаков содержит 19 элементов, включающих характеристики трех двигательных упражнений для оценки ДАР и характеристики МА и ЛВ для оценки мимики.

2. Достижимые точности распознавания БП в режиме 8-кратной кросс-валидации на сформированной в работе базе данных пациентов и контрольной группы составляют 90,6 % - при оценке ДАР и 93,8 % - при оценке мимики по признакам МА и ЛВ. При совместной оценке ДАР и мимики точность составляет 96,9 % и достигается при использовании от 4-х до 18-ти последовательно отобранных признаков, в обязательном порядке включающих признаки, как ДАР, так и МА и ЛВ.

3. Разработанный алгоритм обработки сигналов ДАР и МА, основанный на оценке пригодности сигнала к автоматической обработке с последующим адаптивным сглаживанием и локализацией экстремумов, обеспечивает погрешность расчета характеристик ДАР и МА, не превышающую допустимую.

4. Использование тестовых данных, не участвовавших ранее в процедуре кросс-валидации и при построении модели распознавания БП, приводит к

снижению точности более чем на 20 % при использовании только признаков ДАР, на величину менее 2 % при использовании мимических признаков МА и ЛВ, и на величину менее 4 % при совместном использовании признаков ДАР и мимики. Наивысшая точность распознавания БП соответствует совместной оценке ДАР и мимики и составляет на исследованной выборке 93,6 %.

**Методы исследования.** В работе использованы методы математической статистики, методы цифровой обработки сигналов, методы обработки и анализа данных, методы машинного обучения и распознавания образов, элементы теории биотехнических систем.

**Достоверность результатов** основывается на использовании в работе основных положений теории биотехнических систем, методов математической статистики и других известных методов исследования. Полученные результаты не противоречат общепризнанным принципам и результатам исследований, опубликованным в работах отечественных и зарубежных авторов.

**Внедрение и использование.** Результаты диссертационной работы использованы в деятельности ФГБНУ «Научный центр неврологии» при обследовании пациентов с клинической картиной болезни Паркинсона; использованы при выполнении с участием автора прикладных научных исследований «Создание Стенда для отработки аппаратно-программного комплекса телеметрического контроля жизненно важных функций организма человека и создание автоматизированной экспертной системы поддержки принятия решения, выбора коррекционных и профилактических мероприятий удаленного доступа» (Задание № 8.12871.2018/12.1); внедрены в учебный процесс кафедры «Биомедицинские технические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Апробация материалов диссертации.** Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались на конференциях: «2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)» (Екатеринбург, 2020), «26th IEEE Conference of Open Innovations Association FRUCT» (Ярославль, 2020), «27th IEEE Conference of Open Innovations Association FRUCT» (Тренто, Италия, 2020), «28th IEEE Conference of Open Innovations Association FRUCT» (Москва, 2021), «2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2020 EIConRus)» (Москва, 2020), «2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2021 EIConRus)» (Москва, 2021), «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии (ФРЭМЭ-2018)» (Владимир-Суздаль, 2018), «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии (ФРЭМЭ-2020)» (Владимир, 2020).

**Публикации.** Основные результаты диссертационного исследования представлены в 10 научных работах, включая 2 статьи в рецензируемых журналах и изданиях из перечня ВАК РФ и 6 статей, индексируемых в Scopus. Общий объем 3,65 п.л.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Основное содержание работы изложено на 131 странице, работа содержит 38

рисунков, 37 таблиц и список литературы из 147 библиографических источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность диссертационного исследования, сформулирована цель и задачи работы, научная новизна и защищаемые положения, представлены общие сведения о работе.

**В первой главе** установлены основные сведения о БП, проведен анализ работ, посвященных автоматизированной оценке симптомов БП.

Клиническая диагностика БП в настоящее время осуществляется по общепринятым диагностическим критериям данного заболевания («UK Parkinson's Disease Society Brain Bank»). Диагностический процесс начинается с выявления основных симптомов: гипокинезия, тремор, мышечная ригидность, постуральная неустойчивость, причем гипокинезия является облигатным симптомом БП. При гипокинезии нарушается речь, мимика, двигательная активность конечностей, походка и др.

По результатам анализа тематик более 10 тыс. публикаций в области автоматизированной оценки гипокинезии за период с 2017 по 2021 гг. выделены локализации и двигательные задачи, наиболее часто используемые при автоматизированном анализе БП. Наиболее перспективными для оценки гипокинезии являются оценка двигательной активности рук (ДАР) и мимики, которую можно проводить также и в домашних условиях с помощью бесконтактных методов регистрации данных.

Существующие критерии оценки мимики, представленные в разделе 3.2 шкалы MDS-UPDRS, не в полной мере раскрывает оценку мимических нарушений при БП. На основе анализа отечественной и зарубежной литературы показано, что оценку мимики целесообразно проводить по двигательным единицам (ДЕ) на основе системы кодирования лицевых движений (СКЛиД) с учетом «Протокола оценки межличностного общения – версия для болезни Паркинсона» (ICRP-IEB). По результатам анализа публикаций в данной области оценка мимики разделена на оценку ее динамической и статической составляющей.

Динамическую составляющую мимики – мимическую активность (МА) целесообразно оценивать с учетом интенсивности, скорости и других параметров движения, а также истощаемости движений. Статическую составляющую мимики целесообразно оценивать по лицевой выразительности (ЛВ) 6 базовых эмоций (злость, страх, отвращение, радость, печаль, удивление) при их произвольном выражении и при их имитации с учетом нейтрального выражения лица.

Оценку ДАР при БП целесообразно проводить по трем упражнениям из третьей части шкалы MDS-UPDRS: постукивание пальцами (FT), открытие/закрытие ладони (OC), пронация/супинация кисти (PS).

**Во второй главе** проведен обзор технических средств регистрации данных ДАР и мимики. Для получения данных ДАР выбран 3D датчик Leap

Motion, программное обеспечение которого позволяет регистрировать координаты X, Y, Z и углы поворота 22 ключевых точек ладони в 3-мерном пространстве.

Данные МА и ЛВ регистрируются с помощью 2D веб-камеры с частотой кадров 60 кадров/с и разрешением изображения 1920x1080 элементов. Для автоматизированного детектирования ДЕ на каждом кадре видеозаписи в соответствии с СКЛид выбрано программное средство OpenFace, которое способно определять интенсивность проявления (по шкале от 0 до 5) 16-ти ДЕ по 2D изображению лица.

На рисунке 1 показано расположение технических средств при регистрации данных пациента.

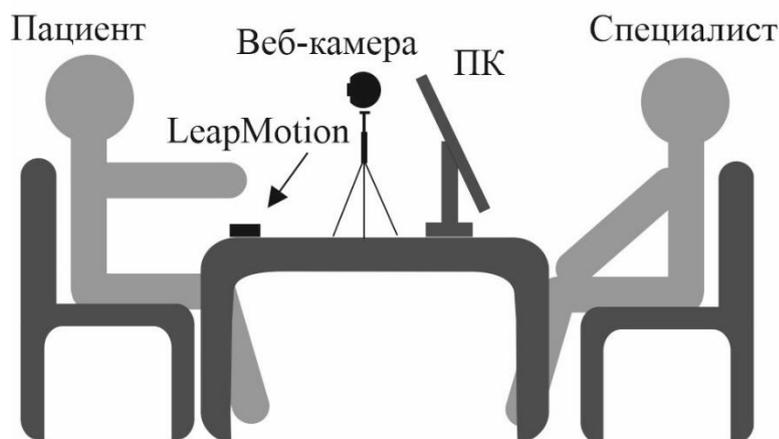


Рисунок 1. Расположение технических средств при регистрации данных пациента

В процессе регистрации данных по указанию специалиста-оператора испытуемый выполняет три упражнения из 3-й части шкалы MDS-UPDRS: FT, OC и PS – с максимально возможной амплитудой и скоростью, согласно методике, приведенной в MDS-UPDRS. Длительность записи каждого упражнения составляла 16 секунд. Каждое упражнение выполнялось сначала правой потом левой рукой. После регистрации ДАР выполняется регистрация видеоизображения лица с упражнениями на МА и ЛВ, после чего цикл регистрации ДАР повторяется второй раз. Для каждого испытуемого число записей для анализа ДАР составляет 12 (3 упражнения, 2 руки, 2 повтора).

На основе результатов выполненного в Главе 1 анализа литературных источников и с учетом протокола ICRP-IEB определены 4 двигательных упражнения, направленных на оценку МА и активизирующих соответствующие ДЕ: «зажмурить глаза» (ДЕ04, ДЕ07), «поднять брови» (ДЕ01, ДЕ02), «улыбнуться с усилием» (ДЕ06, ДЕ12, ДЕ14), «сдвинуть брови» (ДЕ04). Каждое мимическое упражнение предложено выполнять в виде серии из 10-ти повторений. По аналогии с рекомендациями к оценке ДАР из 3-й части MDS-UPDRS, для выявления эффекта усталости испытуемый выполняет мимические упражнения с максимальным усилием и как можно большей скоростью.

Длительность записи упражнений определялась временем выполнения испытуемым 10-ти повторов.

Упражнения на ЛВ заключаются в произвольном изображении испытуемым называемых оператором 6 базовых эмоций с максимальной выразительностью, затем – в имитации эти же 6 базовых эмоций по предъявляемым по очереди фотографиям. Кроме этого, для последующей оценки степени выразительности лица относительно нейтрального состояния, производится запись нейтрального выражения лица.

Для построения двигательных сигналов ДАР для каждого упражнения определялась амплитуда движения по ключевым точкам руки. Для упражнения FT использовалось евклидово расстояние между кончиками указательного и большого пальцев; для ОС – евклидово расстояние между кончиком среднего пальца и центром ладони; для PS – угол поворота центра ладони. Для оценки МА строились двигательные сигналы как зависимость показателя интенсивности ДЕ от времени. На сигналах выполнялась локализация экстремумов в полуавтоматическом режиме с преимущественно ручкой разметкой. Примеры сигналов ДАР и МА для испытуемого контрольной группы (КГ) и пациента с БП представлены на Рисунке 2.

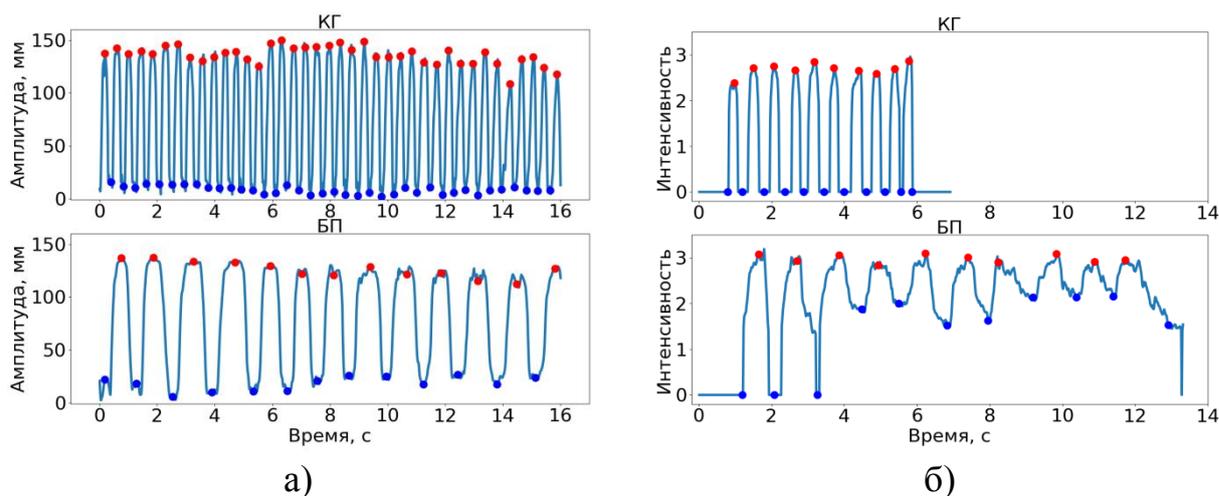


Рисунок 2. Двигательные сигналы для КГ и группы пациентов с БП а) ДАР при выполнении упражнения FT, б) МА для ДЕ04 при выполнении упражнения «сдвинуть брови»

При БП нарушается инициация движений, поэтому параметры скорости принято рассчитывать отдельно для фазы открытия и фазы закрытия. Кроме этого необходимо учесть такой параметр, как декремент, который выявляется при многократном повторении упражнений. В целом, по каждому сигналу ДАР и МА рассчитывались 11 кинематических параметров. Расчет осуществлялся по размеченным точкам экстремумов сигнала (Рисунок 3) на основе важных показателей движения: частота (1), скорость фазы открытия (2), скорость фазы закрытия (3), амплитуда (4). Перечень кинематических параметров приведен в Таблице 1.

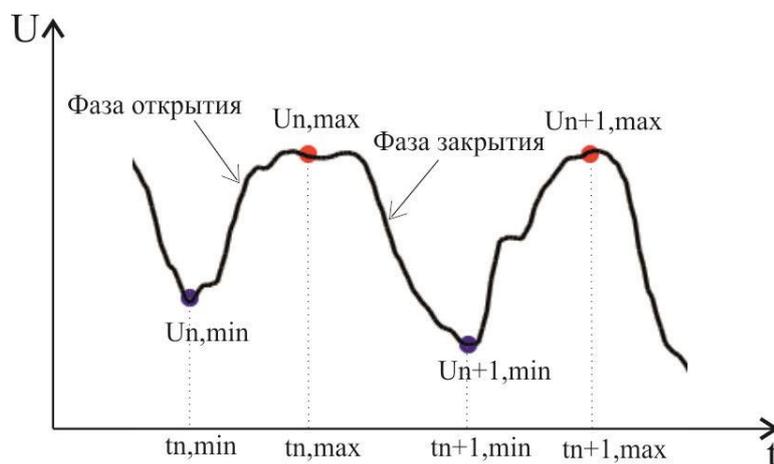


Рисунок 3. Фрагмент двигательного сигнала; n – номер точки экстремума, U – интенсивность

$$Frq_n = \frac{1}{t_{n+1,max} - t_{n,max}}, \quad (1)$$

$$Vopen_n = \frac{U_{n,max} - U_{n,min}}{t_{n,max} - t_{n,min}}, \quad (2)$$

$$Vclose_n = \frac{U_{n,max} - U_{n+1,min}}{t_{n,max} - t_{n+1,min}}, \quad (3)$$

$$A_n = \frac{(U_{n,max} - U_{n,min}) + (U_{n,max} - U_{n+1,min})}{2}. \quad (4)$$

Таблица 1.

Кинематические параметры двигательных сигналов

Обозначение	Определение
AvgFrq	Средняя частота
VarFrq	Вариация частоты
AvgVopen	Средняя скорость открытия
VarVopen	Вариация скорости открытия
AvgVclose	Средняя скорость закрытия
VarVclose	Вариация скорости закрытия
AvgA	Средняя амплитуда
VarA	Вариация амплитуды
NumA/Length	Количество движений / Длительность записи
DecA	Декремент амплитуды
DecV	Декремент скорости

Для количественной оценки ЛВ использовалось евклидово расстояние D между вектором интенсивностей ДЕ нейтрального состояния и вектором интенсивностей ДЕ эмоционального выражения, характеризующее степень

выразительности лица (5). Чем больше евклидово расстояние между векторами, тем больше выразительность лица для рассматриваемой эмоции по сравнению с нейтральным состоянием.

$$D = \sqrt{(A_{01,em} - A_{01,neu})^2 + \dots + (A_{26,em} - A_{26,neu})^2}, \quad (5)$$

где  $A_{j,em}$  – интенсивность  $j$ -ой ДЕ, определенная при эмоциональном выражении;  $A_{j,neu}$  – интенсивность ДЕ, определенная при нейтральном состоянии.

Таким образом, был сформирован комплекс характеристик двигательной активности лица и рук, состоящий из 144 характеристик: по 11 кинематических параметров для 3 двигательных упражнений на ДАР, по 11 кинематических параметров для 9 ДЕ, активизирующихся при выполнении двигательных упражнений на МА, и одного параметра ЛВ, рассчитанного для каждой из 6 базовых эмоций, выраженной двумя способами (произвольно и при имитации).

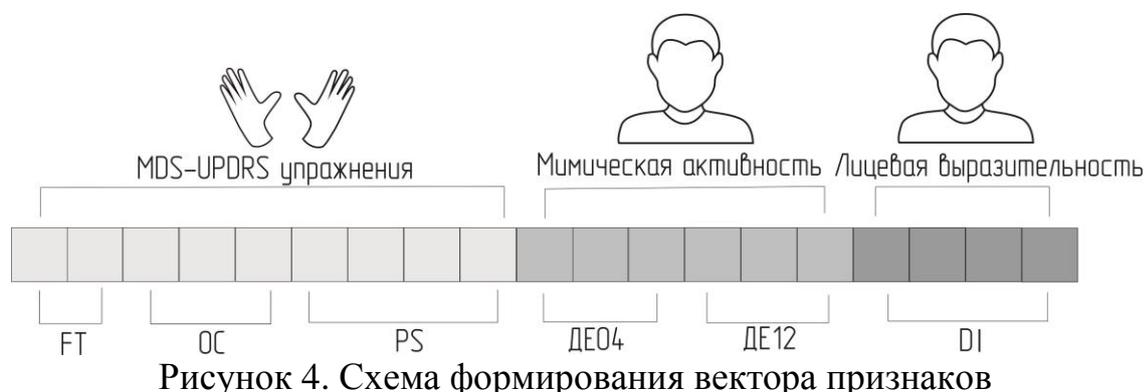
Дальнейшие исследования были направлены на отбор признаков и на построение модели распознавания БП. Для проведения исследований была собрана база данных группы пациентов с БП на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научный центр неврологии». Данные КГ были получены на базе научно-образовательного медико-технологического центра МГТУ им. Н.Э. Баумана. В исследовании на данном этапе участвовали 32 человека: 16 пациентов с БП и 16 испытуемых КГ. Участники КГ не имели в анамнезе неврологических, двигательных и когнитивных заболеваний или расстройств. Все участники подписали добровольное согласие на участие в исследовании и согласие на обработку персональных данных.

В результате проведения статистического анализа всех сформированных характеристик ДАР, МА и ЛВ выполнен отбор информативных для распознавания БП признаков. Статистический анализ заключался в проверке соответствия признаков нормальному закону распределения, проверке статистической значимости различий между группами по каждой характеристике и анализе мультиколлинеарности отобранных характеристик.

Показано, что информативными являются характеристики всех трех двигательных упражнений на ДАР (FT, ОС и PS), характеристики ДЕ12, регистрируемой при выполнении упражнения «улыбнуться с усилием», и ДЕ04, регистрируемой при выполнении упражнения «сдвинуть брови», и степени выразительности 4-х имитированных базовых эмоций. Всего было отобрано 19 некоррелированных характеристик (Рисунок 4).

Для построения модели бинарной классификации было проведено исследование 7-ми классификаторов в режиме 8-кратной кросс-валидации. В качестве векторов признаков использовался как полный вектор признаков, включающий 19 отобранных характеристик, так и его подмножества, включающие только характеристики ДАР, только характеристики МА, только характеристики ЛВ и объединенные мимические характеристики (МА и ЛВ).

Наилучший результат классификации (93,8 %) получен при использовании объединенного вектора признаков ДАР+МА+ЛВ. Среди задач по оценке мимики, наилучший результат был получен для вектора признаков, включающего объединенные мимические характеристики (90,6 %).



Для повышения точности классификации проведен дополнительный отбор признаков с использованием жадного алгоритма. Определены зависимости точности распознавания БП в режиме 8-кратной кросс-валидации на наборе данных с ручной разметкой (cv1), от числа используемых признаков (Рисунок 5). Максимально достижимая точность распознавания БП составляет 90,6 % с классификатором SVM при использовании только признаков ДАР и 93,8 % с наивным байесовским классификатором при использовании только мимических признаков (МА+ЛВ). При совместной оценке ДАР и мимики с наивным байесовским классификатором точность составляет 96,9 % и достигается при использовании от 4-х до 18-ти последовательно отобранных признаков, в обязательном порядке включающих признаки, как ДАР, так и МА и ЛВ.

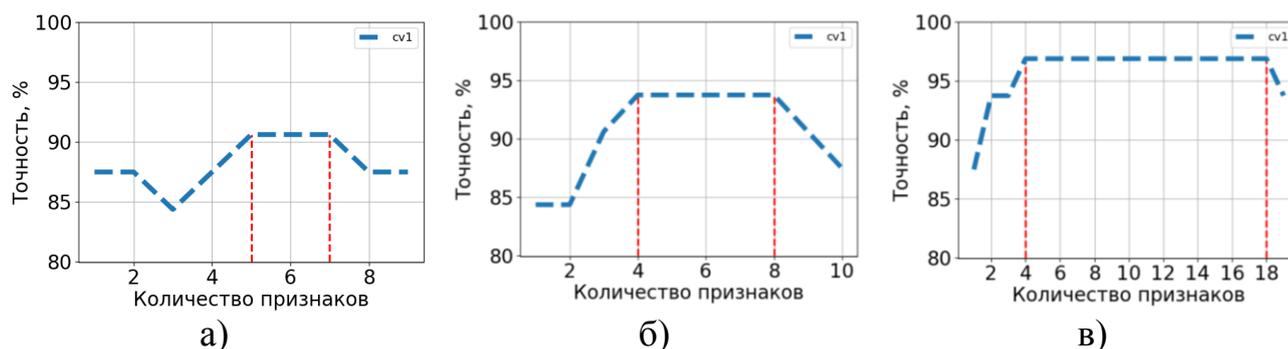


Рисунок 5. Зависимость точности классификации от количества признаков на подмножестве признаков: а) ДАР, б) МА+ЛВ, в) ДАР+МА+ЛВ

В третьей главе представлена БТС, которая включает 4 подсистемы: биологическую, информационную, техническую и программную (Рисунок 6). Определены требования к ее элементам. Разработан макет аппаратно-программного комплекса для регистрации и обработки данных ДАР и мимики. Интерфейс программного обеспечения представлен на рисунке 7.

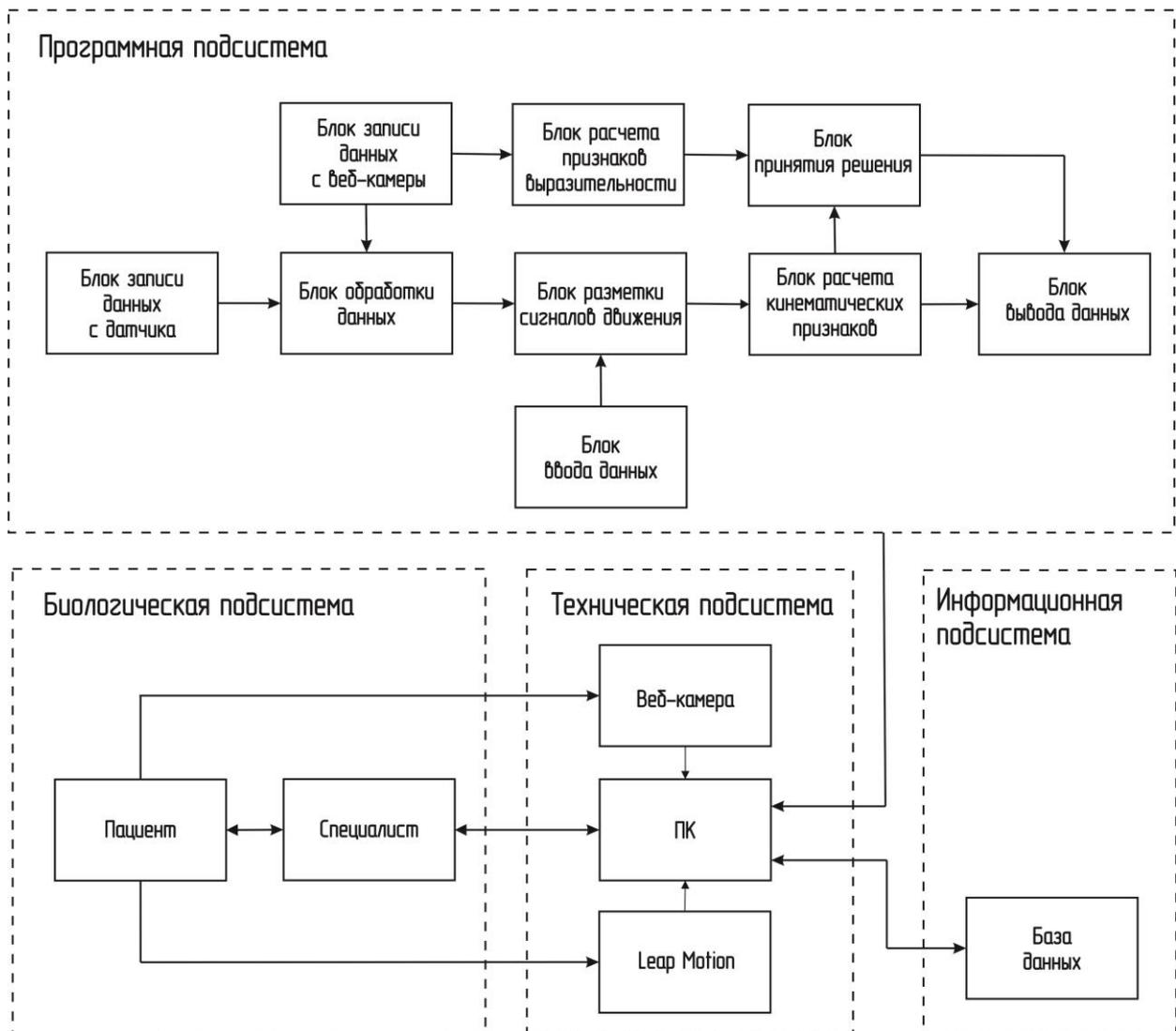


Рисунок 6. Схема БТС для исследования БП по видеоизображению лица и ДАР

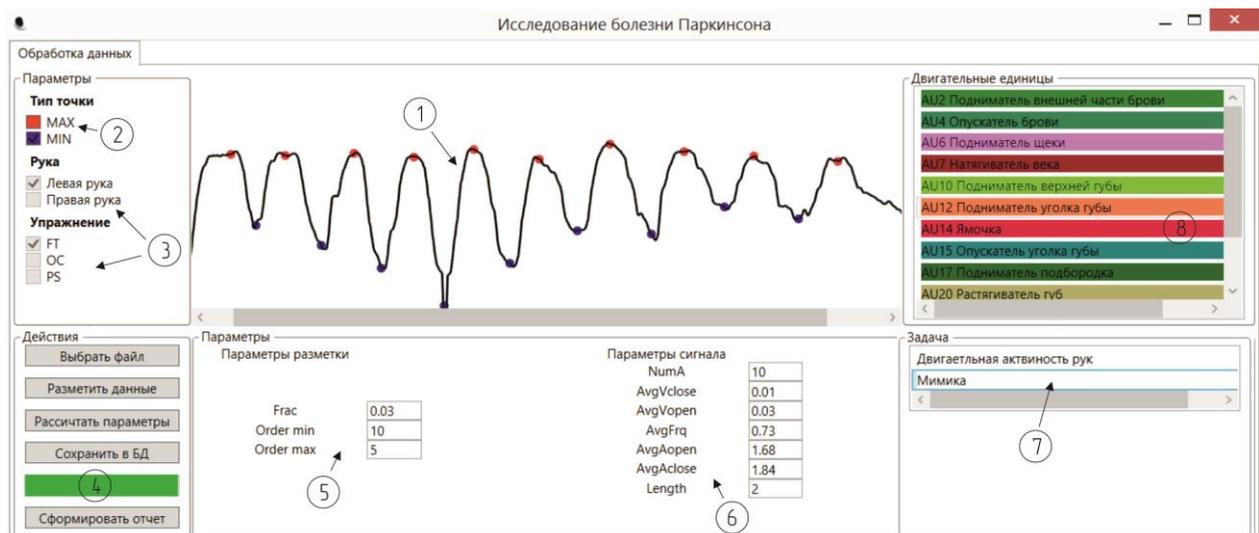


Рисунок 7. Пользовательское приложение: 1 – поле для разметки сигнала движения, 2 – выбор типа точки для ручной разметки, 3 – выбор параметров обработки данных ДАР, 4 – кнопки для работы с данными, 5 – установка параметров разметки графика сигнала, 6 – кинематические параметры сигнала, 7 – выбор задачи для обработки данных, 8 – выбор ДЕ для разметки

При функционировании БТС работа определенных блоков может вносить погрешность в результирующие расчетные значения признаков. Источниками возможных погрешностей являются: блок записи данных с веб-камеры, блок записи данных с датчика, блок разметки сигналов движения.

Для оценки предела допустимой погрешности, при которой точность классификации не изменится, было проведено моделирование погрешностей и проведен расчет значения точности классификации в зависимости от вносимой погрешности на наборах признаков (от 4-х до 18-ти) при использовании наивного байесовского классификатора, который показал наилучшую точность распознавания БП на данных ручной разметки и объединенном векторе признаков. Средние значения допустимой погрешности расчета характеристик ДАР, МА и ЛВ, входящих в набор 19 некоррелированных характеристик: составили 6,6 % – для характеристик ДАР, 8,8 % – для характеристик МА и 12,9 % – для характеристик ЛВ.

С использованием собранных стендов, включающих макеты руки, позволяющие совершать воспроизводимые движения с заданной амплитудой при выполнении упражнений FT и PS, проведена экспериментальная оценка погрешности определения амплитуды движений датчиком Leap Motion. Показано, что средняя относительная погрешность определения амплитуды при выполнении упражнения FT не превышает 2 %, упражнения PS – 1 % для различных амплитуд движения. Полученные значения удовлетворяют требованиям к допустимым погрешностям.

Для автоматизации процесса обработки регистрируемых сигналов ДАР и МА был разработан соответствующий алгоритм, заключающийся в оценке качества сигнала с последующими адаптивным сглаживанием и локализацией экстремумов. Показано, что качество сигнала может быть оценено по значению частоты его основной гармоники ( $F_{max}$ ) и по доле его энергии, заключенной в узкой полосе частот в окрестности основной гармоники ( $K$ ); определены соответствующие пороговые значения. Сигналы, пригодные для автоматической обработки, были разделены на 4 типа в зависимости от  $F_{max}$ : «медленные», «очень медленные», «быстрые», «очень быстрые» (Таблица 2).

Среди сигналов ДАР в КГ преобладает «быстрый» тип сигнала, а в группе БП «быстрый» и «медленный» типы. Среди сигналов МА в КГ преобладает «медленный» тип сигнала, в группе БП – «очень медленный». Для значительной доли сигналов МА в группе БП (12,5 %) необходима ручная локализация экстремумов.

Таблица 2.

Данные для обработки сигналов

Тип сигнала	K, отн.ед.	Fmax, Гц	ДАР, %		МА, %	
			КГ	БП	КГ	БП
Очень медленный	K > 0,5	$0,4 \leq F_{max} < 1$	-	6,7	-	56,2
Медленный		$1 \leq F_{max} < 2$	12,3	44,1	100	31,2
Быстрый		$2 \leq F_{max} < 5$	76,5	46,1	-	-
Очень быстрый		$F_{max} \geq 5$	10,7	-	-	-
Ручная обработка	K < 0,5 или $F_{max} < 0,4$		-	0,5	3,1	-

В зависимости от типа сигнала были подобраны параметры функции сглаживания Locally Weighted Scatterplot Smoothing (LOWESS) и функций локализации максимумов и минимумов, реализация которых взята из соответствующих модулей языка python.

С использованием данных ручной разметки проведено определение погрешности расчета характеристик при автоматической обработке двигательных сигналов. Средние погрешности расчета характеристик ДАР и МА при автоматической локализации экстремумов составили 2,2 % и 6,3 % соответственно, что удовлетворяет требованиям к допустимым погрешностям.

**Четвертая глава** посвящена исследованию показателей эффективности применения БТС. Для апробации разработанной БТС была проведена повторная регистрация данных участников КГ и 10-ти новых пациентов с БП. В ходе повторной регистрации КГ получено 52 записи 13-ти здоровых испытуемых, зарегистрированных повторно в разное время от 3 до 5 раз, и проведены исследования биологической вариации 19-ти информативных характеристик ДАР, МА и ЛВ. Показано, что среди них присутствуют характеристики, на основе которых возможно построение системы индивидуального мониторинга развития двигательных нарушений.

Для обеспечения устойчивости модели распознавания БП к тестовым данным было проведено два исследования с использованием ранее собранной базы данных и, затем, с использованием новых записей, в ходе которых была выполнена коррекция вектора признаков.

Для получения наилучшей комбинации признаков в условиях применения автоматизированного алгоритма обработки двигательных сигналов был повторно применен жадный алгоритм со скорректированным методом расчета общей точности классификации. Общая точность классификации рассчитывалась как среднее значение трех значений точности, каждое из которых было получено в режиме 8-кратной кросс-валидации для своего варианта обучающей и тестовой подвыборки: весь набор данных получен в режиме ручной разметки (cv1, использовался также в Главе 2), весь набор данных получен с применением автоматизированной разметки (cv2), на каждой итерации кросс-валидации для обучения использовался набор данных с ручной разметкой, а для тестирования – с автоматизированной (cv3). Показано что, ранее определенная достижимая точность распознавания БП сохраняется при использовании автоматизированного алгоритма обработки сигналов (см. Рисунок 8). Определены соответствующие наборы признаков ДАР, МА и ЛВ.

С использованием автоматизированного алгоритма обработки данных выполнено тестирование ранее выбранных классификаторов на тестовой выборке (ValAuto), состоящей из 10 записей новых пациентов с БП и 52 записей испытуемых КГ. Для расчета характеристик ДАР и МА в данной группе использовался только автоматизированный алгоритм. Результирующие наилучшие наборы признаков для подмножеств признаков ДАР, мимических признаков (МА+ЛВ) и признаков всех трех двигательных задач (ДАР+МА+ЛВ) были выбраны исходя из максимальных значений точности на тестовой выборке ValAuto с учетом точности для cv1, cv2, cv3. Наибольшая точность

распознавания БП достигается при использовании объединенного вектора признаков, включающего 14 характеристик трех двигательных задач (Рисунок 8, Таблица 3). Для данного набора характеристик в ходе моделирования были уточнены требования по допустимым погрешностям их оценки при одновременном действии погрешностей и показано соблюдение данных требований.

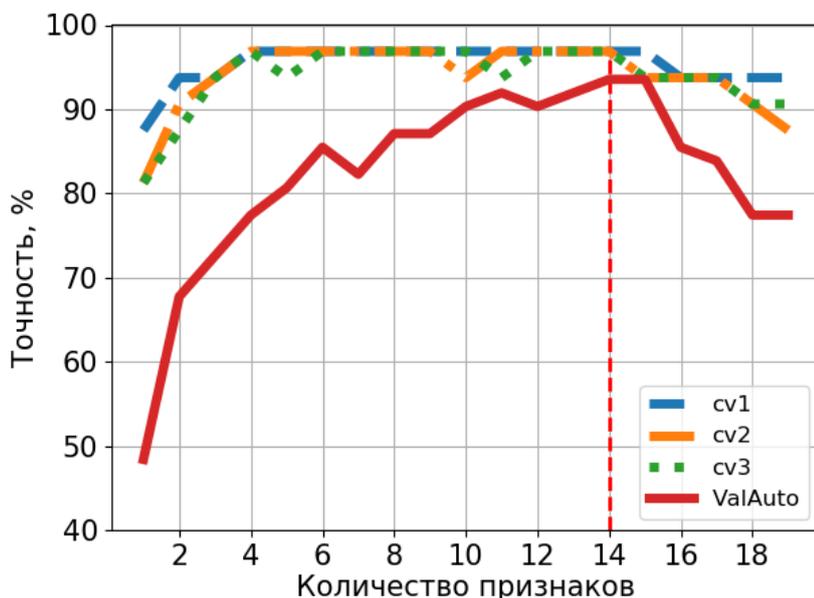


Рисунок 8. Зависимость точности для наборов данных cv1, cv2, cv3 и ValAuto от количества признаков всех трех двигательных задач (ДАР, МА и ЛВ).

Показатели эффективности применения БТС в зависимости от подмножества признаков представлены в Таблице 4. В дополнении к точности на тестовой выборке были рассчитаны чувствительность и специфичность.

Таблица 3.

Показатели эффективности применения БТС

Подмножество признаков	ДАР	МА+ЛВ	ДАР+МА+ЛВ	
Число признаков	7	8	14	
Точность на cv1, cv2, cv3, %	90,6	93,8	96,9	
Точность на ValAuto, %	69,4	91,9	93,6	
Чувствительность на ValAuto, %	80	80	90	100
Специфичность на ValAuto, %	67,3	94,2	94,2	71,1

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведены исследования подходов к оценке гипокинезии при диагностике болезни Паркинсона и показана целесообразность использования количественных характеристик ДАР, основанных на оценке выполнения трех двигательных упражнений в соответствии с MDS-UPDRS, и мимических характеристик, включая характеристики МА и ЛВ; предложены методы их оценки.

2. Сформирован комплекс характеристик из 144 характеристик гипокинезии, включающий 11 параметров сигнала ДАР для каждого из 3 двигательных упражнений, 11 параметров сигнала МА для каждой из 9 ДЕ, и 12 характеристик ЛВ. С использованием собранной базы данных пациентов с БП и КГ из него отобраны 19 информативных для распознавания БП некоррелированных признаков.

3. Показано, что одновременное использование отобранных признаков ДАР и мимики, описываемой признаками МА и ЛВ, с применением наивного байесовского классификатора обеспечивает повышение точности распознавания БП. Использование признаков ДАР и мимики по-отдельности приводит к снижению точности распознавания на однородной выборке на величину от 3 до 6 %.

4. Сформулированы требования по допустимым погрешностям расчета характеристик ДАР, МА и ЛВ, входящих в набор 19 некоррелированных признаков. Для характеристик ДАР допустимые погрешности составляют 6,6 %, для характеристик МА – 8,8 %, для характеристик ЛВ – 12,9 %. Данные значения обеспечивают сохранение достигнутых значений точности распознавания БП, полученных для случая экспертного определения характеристик.

5. Разработан алгоритм обработки сигналов ДАР и МА, заключающийся в оценке качества сигнала с последующим адаптивным сглаживанием и локализацией экстремумов. Показано, что качество сигнала ДАР и МА может быть оценено по значению частоты основной гармоники и по доле его энергии, заключенной в узкой полосе частот в окрестности основной гармоники. Для качественных двигательных сигналов погрешность автоматической оценки характеристик ДАР и МА не превышает допустимую.

6. Экспериментально показано, что признаки ДАР, характеризующие выполнение испытуемым трех двигательных упражнений по MDS-UPDRS, не являются устойчивыми к тестовой выборке по сравнению с мимическими признаками и не могут быть независимо использованы для распознавания БП на практике. В то же время, использование признаков мимики независимо или совместно с признаками ДАР обеспечивает устойчивость результатов распознавания БП к тестовой выборке.

7. Разработан новый метод автоматизированного распознавания БП по видеоизображению лица и ДАР, основанный на построении сигналов движения в процессе выполнения испытуемым специальных упражнений, автоматизированном расчете 14 признаков, характеризующих ДАР, МА и ЛВ и применении наивного байесовского классификатора. Метод реализован в созданном аппаратно-программном комплексе, по результатам апробации которого точность распознавания БП составила 93,6 %.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Разработка и исследование метода автоматизированного распознавания болезни Паркинсона на основе комбинации признаков двигательной

активности рук, мимической активности и лицевой выразительности / Мошкова А.А. [и др.] // Биомедицинская радиоэлектроника. 2021. Т. 24. № 2. С. 30-38. (1,3 п.л. / 0,37 п.л.)

2. Биотехническая система для исследования мимики и двигательной активности рук пациентов при болезни Паркинсона / Мошкова А.А. [и др.] // Биотехносфера. 2020. № 1. С. 54–60. (0,7 п.л. / 0,23 п.л.)

3. Studying Facial Activity in Parkinson's Disease Patients Using an Automated Method and Video Recording / Moshkova A.A. [и др.] // 2021 28th Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Moscow, Russia, 2021. P. 301-308. (1,62 п.л. / 0,54 п.л.)

4. Hand Movement Kinematic Parameters Assessment for Parkinson's Disease Patients / Moshkova A.A. [и др.] // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 2021. P. 2836-2841. (0,94 п.л. / 0,38 п.л.)

5. Facial Emotional Expression Assessment in Parkinson's Disease by Automated Algorithm Based on Action Units / Moshkova A.A. [и др.] // 2020 27th Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Trento, Italy, 2020. P. 172-178. (1,5 п.л. / 0,5 п.л.)

6. Parkinson's Disease Detection by Using Machine Learning Algorithms and Hand Movement Signal from LeapMotion Sensor / Moshkova A.A. [и др.] // 2020 26th Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Yaroslavl, Russia, 2020. P. 321-327. (1,5 п.л. / 0,5 п.л.)

7. High accuracy discrimination of Parkinson's disease from healthy controls by hand movements analysis using LeapMotion sensor and 1D convolutional neural network / Moshkova A.A. [и др.] // Proceedings of the 2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT 2020), 2020. P.62-65. (0,62 п.л. / 0,31 п.л.)

8. Study of the Algorithm for Assessing a Person's Emotional State by a Face Image Using Actions Units / Moshkova A.A. [и др.] // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020. P. 2519-2523. (0,88 п.л. / 0,44 п.л.)

9. Автоматизированный модуль для исследования двигательных проявлений болезни Паркинсона / Мошкова А.А. [и др.] // XIV Международная научная конференция “ФИЗИКА И РАДИОЭЛЕКТРОНИКА В МЕДИЦИНЕ И ЭКОЛОГИИ” с научной молодежной школой им. И.Н. Спиридонова ФРЭМЭ’2020 1 - 3 июля 2020 года. Труды, 2020, С. 80-83. (0,44 п.л. / 0,22 п.л.)

10. Разработка и исследование алгоритмов автоматического распознавания базовых эмоций по 2D изображению лица / Мошкова А.А. [и др.] // XIII Международная научная конференция “ФИЗИКА И РАДИОЭЛЕКТРОНИКА В МЕДИЦИНЕ И ЭКОЛОГИИ” с научной молодежной школой им. И.Н. Спиридонова ФРЭМЭ’2018 3 - 5 июля 2018 года. Труды, 2018, С. 65-68. (0,5 п.л. / 0,16 п.л.)