

УДК 004.93:004.94

ОБРАБОТКА ПАРНЫХ ТЕНЗОТРЕМОРОГРАММ И ДИАГНОСТИКА БОЛЕЗНИ ПАРКИНСОНА

Жвалевский О.В. (Санкт-Петербург)

Введение

Болезнь Паркинсона (БП) – это нейродегенеративное заболевание, которое характеризуется гибелью нейронов, вырабатывающих дофамин [1]. Основные симптомы БП – это акинезия (затруднённая движения), ригидность (повышенный тонус мышц) и тремор (низкочастотные колебания конечностей). Данные симптомы могут наблюдаться как вместе, так и по отдельности. В основном, эти симптомы проявляются уже тогда, когда большая часть дофаминергических нейронов погибла. В связи с этим представляется необходимым иметь возможность раннего обнаружения БП и использовать имеющиеся в организме компенсаторные и восстановительные механизмы [2]. Кроме того, существует целый комплекс заболеваний, имеющих сходные с БП симптомы, но отличное от БП происхождение, под общим названием «синдром паркинсонизма». БП традиционно оценивают по той или иной шкале. Наибольшую популярность имеет шкала по Хёну-Яру. Между тем, хотелось бы иметь некую объективную шкалу, позволяющую эффективно строить решающие правила и создавать системы поддержки принятия врачебных решений.

Моторные проявления БП (в первую очередь тремор) проявляются достаточно поздно, и поэтому их применение для ранней диагностики БП представляется затруднительным. Однако имеется целый набор немоторных проявлений БП, на основании которых можно строить системы ранней диагностики БП [3].

Традиционные подходы к диагностике БП заключаются в выполнении разного рода функциональных тестов (вроде вычерчивания линий и спиралей). Развитие информационных технологий и, прежде всего, появление смартфонов позволило существенным образом автоматизировать процесс диагностики БП. Помимо выполнения базовых функциональных тестов (и их всевозможных разновидностей), смартфоны позволяют фиксировать параметры каждодневной физической активности пациента и выделять паттерны поведения, свойственные как практически здоровым испытуемым, так и людям больным БП (на той или иной стадии). Например, имеется распределённая система мониторинга состояния людей с БП, основанная как на выполнении определённых тестов в течение дня, так и на регистрации ежедневной физической активности. Данные, получаемые в таких системах, в частности, позволяют более точно оценивать эффективность применения лекарственных препаратов.

Также имеются специализированные системы, которые позволяют регистрировать позу человека и его походку. Регистрация электромиограммы (ЭМГ), особенно игольчатой, является инвазивной процедурой. В то же время, регистрация движений отдельных пальцев и ускорений, развиваемых отдельными звеньями локомоторного аппарата, не является инвазивной. Ведение видеосъёмки позволяет получить ещё более полную информацию о функциональном состоянии пациента. Наиболее полными и точными являются инструментальные методы, основанные на применении того или иного вида томографии.

Несмотря на значительные успехи в автоматизации диагностики БП, существующие способы регистрации физиологических сигналов обладают рядом недостатков. Во-первых, здесь необходимо учитывать технические характеристики измерительной аппаратуры (например, полосы пропускания для датчиков ускорения).

Во-вторых, необходимо учитывать ещё и различные антропометрические параметры испытуемых. В-третьих, различные способы регистрации тремора (например, те, которые строятся на базе смартфонов) далеко не всегда позволяют жёстко фиксировать определённые условия проведения измерительного эксперимента. Отсюда вытекает необходимость в разработке инструментальных подходов к диагностике БП, которые были бы лишены указанных недостатков. Один из таких инструментальных подходов заключается в регистрации усилия, оказываемого кончиками пальцев на чувствительную платформу, обеспеченную пьезорезистивным тензодатчиком. Этот подход предложен проф. С.П. Романовым [4, 5]. Важнейшая особенность такого подхода – это то, что регистрация усилия осуществляется в т.н. *изометрическом* режиме, то есть – при отсутствии движений отдельных звеньев локомоторного аппарата. При этом уровень удерживаемого испытуемым усилия задаётся экспериментатором (врачом-клиницистом). В результате регистрируется не только непосредственно сам уровень удерживаемого испытуемым усилия, но и (после исключения «тренда», соответствующего уровню удерживаемого усилия) сами *непроизвольные* колебания, которые и следует, по сути, называть *истинным* тремором. Непроизвольные колебания содержат достаточно полную информацию о состоянии многокольцевой системы управления движениями (по Н.А. Бернштейну) [6]. В то же время никакой другой способ регистрации не позволяет регистрировать именно непроизвольные колебания. В этом смысле тензометрический способ регистрации тремора является уникальным способом регистрации тремора. Временные ряды, которые получаются при помощи тензометрического способа регистрации тремора, традиционно носят название *тензотреморограмм* (ТТГ).

Тензометрический способ регистрации тремора предполагает одновременную регистрацию двух ТТГ: ТТГ левой руки и ТТГ правой руки. Другими словами, результатом регистрации будут два различных временных ряда. При этом активным образом используется биологическая обратная связь: каждая рука испытуемого воздействует на свою собственную чувствительную платформу и, вместе с ней, на положение собственной метки, являющейся одним из элементов перекрестия, отображаемого на экране компьютера; само перекрестие во время измерительного эксперимента предъявляется испытуемому, и тот должен всё время поддерживать перекрестие в правильном положении; как только элементы перекрестия расходятся в различные стороны, испытуемый делает корректирующие движения, пытаясь восстановить как правильное взаимное расположение меток, управляемых различными руками, так и изначально заданный уровень удерживаемого усилия. Будем называть такие совместные движения двух рук испытуемого (в соответствии с [4]) *содружественными*. Основная гипотеза заключается в том, что у различных испытуемых (испытуемых, относящихся к различным классам) содружественные движения имеют различный характер. Отсюда естественным образом возникает задача определения характера содружественных движений и задача выделения признаков, позволяющих классифицировать содружественные движения по их характеру и использовать полученную классификацию. Настоящая работа посвящена проблеме разработки подходящего математического аппарата, позволяющего исследовать характер содружественных движений.

1. Постановка задачи

Будем рассматривать *парные* временные ряды, то есть – временные ряды, которые получены в результате *одновременной* регистрации того или иного физиологического параметра или показателя [7]. Одновременность регистрации имеет здесь принципиальное значение. В качестве парных временных рядов можно

рассматривать любые временные ряды, полученные для *одноименных* параметров, полученных при помощи одних и тех же способов регистрации. Это могут быть, например, ЭЭГ (соседние ЭЭГ или ЭЭГ, симметрично располагающиеся на скальпе), соседние ЭМГ, две пульсовые волны, полученные с оптоэлектронных датчиков, размещаемых на пальцах рук (как соседних пальцев, так и пальцев разных рук); а также две дыхательные волны, регистрируемые с пьезорезистивных датчиков, один из которых располагается в области груди (и позволяет отслеживать торакальное дыхание), а второй – в области живота (позволяет отслеживать абдоминальное дыхание). В настоящей работе в качестве основного рассматриваются парные друг другу ТТГ, каждая из которых получена для отдельной руки испытуемого.

Пусть $X = [X^{(l)}, X^{(r)}]$ – это упорядоченная пара временных рядов, составляющих вместе двумерный временной ряд – объект анализа; здесь $X^{(l)}$ – это временной ряд, соответствующий левой руке, а $X^{(r)}$ – это временной ряд, соответствующий правой руке. (В случае, если анализируются не ТТГ, соответствие будет совершенно другим, но структурное представление объекта останется тем же.) Пусть также $Y = [Y^{(l)}, Y^{(r)}]$ – это упорядоченная пара временных рядов, представляющая другой объект анализа. Предположим, что объекты X и Y относятся к различным классам. (Например, объект X относится к классу практически здоровых испытуемых, а объект Y – к классу людей, больных БП.) Можем ли мы каким-либо образом различить объекты X и Y посредством исключительно внутреннего сравнительного анализа временных рядов, составляющих каждый из двух объектов?

Сравнительный анализ временных рядов следует воспринимать в терминах некоторой заранее заданной функции расстояния между временными рядами.

Предположим, $d^{(*)}$ – это функция расстояния между временными рядами. Тогда можно определить два *внутриобъектных* расстояния: $d(X^{(l)}, X^{(r)})$ и $d(Y^{(l)}, Y^{(r)})$. Основная гипотеза заключается в том, что, при подходящем подборе функции расстояния $d^{(*)}$, объекты, относящиеся к одному классу (например, к классу практически здоровых испытуемых), будут близки в терминах заданной функции расстояния, в то время как объекты, относящиеся к другому классу (то есть, уже к классу людей, больных БП), будут далёкими в терминах той же функции. (Или наоборот, если будет установлена обратная закономерность.) Таким образом, основная задача заключается в выборе подходящей функции расстояния между временными рядами.

В действительности необходимо рассматривать локальное сходство двух парных друг другу временных рядов, а это значит, что необходимо провести глубокий структурный анализ парных ТТГ и предложить адекватную меру для описания сходства/различия этой локальной структуры. Основную задачу, таким образом, можно сформулировать следующим образом: насколько тесной является связь между локальным поведением одного из двух парных временных рядов и локальным поведением другого парного временного ряда, рассматриваемого с некоторым сдвигом. Величина сдвига (как и характер этого сходства/различия) является важной характеристикой парных ТТГ и может оказаться остаточным информативным признаком для различения нормы и патологии в контексте БП.

2. Структурный анализ временных рядов

Структурный анализ временных рядов заключается в выделении в анализируемых временных рядах структурных элементов и описании классов временных рядов в терминах выделенных структурных элементов. В качестве структурных элементов чаще всего выступают фрагменты временных рядов.

Предполагается, что каждый такой фрагмент – это фрагмент однородности временного ряда, временной ряд составлен из последовательности однородных фрагментов, каждый класс однородности может быть описан при помощи буквы некоторого алфавита, а сам временной ряд, таким образом, может быть представлен в виде символьной последовательности. Таким образом, правильный подбор алфавита (то есть – запаса типовых фрагментов) приведёт к достаточно полной и точной классификации анализируемых временных рядов.

Предположим теперь, что $S^{(l)}$ – это символьная последовательность, при помощи которой описывается временной ряд $X^{(l)}$, а $S^{(r)}$ – это символьная последовательность, при помощи которой описывается временной ряд $X^{(r)}$. Тогда сравнительный анализ временных рядов $X^{(l)}$ и $X^{(r)}$ сводится к сравнительному анализу двух символьных последовательностей $S^{(l)}$ и $S^{(r)}$. Другими словами, основная задача заключается в том, чтобы оценить тем или иным способом сходство последовательностей $S^{(l)}$ и $S^{(r)}$, и на этом основании сделать вывод о принадлежности исходного объекта к одному из заранее заданных классов.

Структурный анализ временных рядов непосредственно связан с динамическим подходом к анализу временных рядов, когда каждый временной ряд рассматривается как результат работы некоторого «источника», то есть – динамической системы, которая «производит» символы (в данном случае – фрагменты временного ряда). Действительно, если Σ – это «источник» фрагментов определённого вида, то некоторый класс временных рядов можно рассматривать как набор допустимых символьных последовательностей, порождаемых «источником» Σ . Соответственно, различные классы временных рядов порождаются различными «источниками», и тогда основная задача анализа заключается в идентификации каждого «источника».

Организация содружественных движений вносит существенный элемент новизны. Действительно, допустим, что испытуемый удерживает некоторый заранее заданный уровень усилия и, продолжая совмещать (правую и левую) метки, нарушает взаимное расположение двух меток. Однократное изменение взаимного расположения двух меток порождает необходимость в коррекции. Однако корректирующие движения (обеих рук) снова изменяют взаимное расположение отображаемых меток, что порождает необходимость в новой коррекции. В результате возникает целая серия корректирующих движений. Другими словами, однократное изменение взаимного расположения двух меток приводит к тому, что можно было бы назвать «эхом». Следует заметить, что новые нарушения взаимного расположения меток накладываются на текущие корректирующие движения, а это значит, что процесс коррекции оказывается сложным (составным) процессом.

В норме (для практически здорового испытуемого) имеется малоамплитудный высокочастотный тремор, который можно рассматривать (в первом приближении) как систему *первичных* (естественных) корректирующих движений около некоторого нулевого уровня (задаваемого экспериментатором). Тремор левой руки и тремор правой руки можно рассматривать (опять же, в первом приближении) как независимые процессы. Совмещение двух меток приводит к некоторой «синхронизации» этих двух изначально независимых процессов. С одной стороны, практически здоровый испытуемый способен точнее (и быстрее) устанавливать некоторый (заданный) уровень удерживаемого усилия, что очевидно уменьшает количество «дополнительных» корректирующих движений и вообще сводит к минимуму наложение одних коррекций на другие. С другой стороны, те же особенности могут провоцировать практически здорового испытуемого на «резкие движения», что, очевидно, будет увеличивать количество наложений. В этом смысле особый интерес представляет сравнительный

анализ ТТГ для различных уровней удерживаемого испытуемым усилия – минимального и максимального. Дополнительную информацию здесь, очевидно, будет нести и сравнительный анализ ТТГ, полученных для измерительного эксперимента типа А и измерительного эксперимента типа Б.

При наличии у испытуемого той или иной двигательной патологии затрудняется само удержание некоторого (заданного) уровня усилия (как по точности, так и по скорости восстановления). Всё это будет, очевидно, приводить к тому, что будет увеличиваться количество корректирующих движений, а также будет возрастать количество наложений одних корректирующих движений на другие.

Сказанное выше предопределяет и характер структурного анализа парных ТТГ. Фактически необходимо: 1) искать похожие (в той или иной устанавливаемой в ходе исследования мере) друг на друга фрагменты (а точнее, структурные элементы), присутствующие в обоих парных временных рядах; 2) описывать характер их сходства и/или различия; 3) использовать это описание для построения соответствующей функции расстояния между временными рядами.

3. Матричный профиль временного ряда

Структурный анализ непосредственным образом опирается на функцию расстояния между временными рядами, которая используется при выделении структурных фрагментов.

Предположим, что временной ряд (а в действительности отрезок бесконечного в обе стороны временного ряда) X представлен в виде упорядоченной во времени последовательности фрагментов $X = (X_i : i = 1 : K)$, которые, в общем случае, могут накладываться друг на друга. Если n – это длина целого временного ряда (количество его отсчётов), а N – это длина каждого фрагмента, то $K = n - N + 1$. Такое представление временного ряда эквивалентно процедуре с участием подвижного окна, которое имеет постоянную ширину N и движется вдоль временного ряда, каждый раз сдвигаясь на один отсчёт вправо. (В общем случае ширина окна является динамически изменяемой величиной.)

Пусть Y – это некоторый фиксированный фрагмент некоторого произвольного временного ряда, а d^* – это функция расстояния между временными рядами. Тогда можно определить функцию $D(X; Y) = [d(X_i, Y) : i = 1 : K]$. Данная функция носит название *дистанционного профиля* временного ряда X по отношению к фрагменту Y . Здесь можно задать пороговое значение ε и у становить, что вхождением фрагмента Y во временной ряд X является такой фрагмент X_i временного ряда X , что $d(X_i, Y) < \varepsilon$. Уменьшая пороговое значение, мы будем уменьшать количество потенциальных вхождений фрагмента Y во временной ряд X , а, значит, будем увеличивать и количество ошибок первого рода («пропуск цели»). И, наоборот, увеличивая пороговое значение, мы будем увеличивать это количество, а, значит, будем и увеличивать количество ошибок второго рода («ложная тревога»). Таким образом, выбор порогового значения является результатом определённого компромисса.

Задавая некоторый пул типовых фрагментов одной и той же длины, можно получить представление каждого анализируемого временного ряда в виде набора упорядоченных во времени вхождений заданных типовых фрагментов. Если при этом рассматривать типовые фрагменты различной длины, то придётся ещё учитывать и возможные вложения одних фрагментов в другие. Это позволяет, в частности, исследовать изменение структуры вхождений каждого из двух фрагментов при изменении порогового значения.

Существует важный частный случай, когда типовые фрагменты берутся из одного и того же временного ряда. Пусть, например, $Y = (Y_j : j = 1:L)$. Тогда вместо простого дистанционного профиля можно построить уже дистанционную матрицу $D(X,Y) = [d(X_i, Y_j) : i = 1:K, j = 1:L]$. Каждый столбец матрицы $D(X,Y)$ – это дистанционный профиль временного ряда X по отношению к соответствующему фрагменту временного ряда Y . В то же время каждая строка матрицы $D(X,Y)$ – это дистанционный профиль временного ряда Y по отношению к соответствующему фрагменту временного ряда X . Определим теперь в каждой строке матрицы $D(X,Y)$ *наименьший* элемент, то есть – сопоставим каждому фрагменту X_i временного ряда X его ближайшего соседа во временном ряду Y . Построенный таким образом вектор $P(X,Y)$ дистанционных значений носит специальное название *матричного профиля* временного ряда X по отношению к *целому* временному ряду Y . Само соответствие описывается при помощи индекса $I(X,Y)$, сопровождающего матричный профиль $P(X,Y)$. Аналогично строится и матричный профиль $P(Y,X)$ временного ряда Y по отношению к временному ряду X и сопровождающий его индекс $I(Y,X)$. В случае, когда строится матричный профиль временного ряда по отношению к самому себе, дополнительно вводится ограничение на поиск ближайшего соседа, позволяющее исключить т.н. «тривиальные вхождения», когда из поиска исключается текущий (целевой) фрагмент вместе с его некоторой окрестностью.

Наличие индексов $I(X,Y)$ и $I(Y,X)$ позволяет строить «движения» следующего вида. Пусть i – это порядковый номер некоторого фрагмента из временного ряда X , а j – это порядковый номер некоторого фрагмента из временного ряда Y . Определим отображение $p : i \rightarrow I(X,Y)(i)$ и двойственное ему отображение $q : j \rightarrow I(Y,X)(j)$. Тогда можно построить последовательность вида $i_1, j_1, i_2, j_2, i_3, \dots$, где каждая пара соседних элементов связана отображениями p и q : $j_k = p(i_k)$ и $i_{k+1} = q(j_k)$. Аналогичные «движения» возникают и при построении матричных профилей для отдельных временных рядов X и Y .

Каждое «движение» описывает некоторый элемент *структуры близости* двух заданных временных рядов, а это значит, что все имеющиеся «движения» описывают в целом сходство двух временных рядов или, что то же самое, «структуру близости» (двух заданных временных рядов). Особая ситуация возникает тогда, когда временной ряд описывается в терминах самого себя, и строятся внутренние «движения» заданного временного ряда, описывающие внутреннюю «структуру близости», играющие роль препроцессинга (временного ряда). Таким образом, при проведении сравнительного анализа двух заданных временных рядов X и Y необходимо строить четыре различных матричных профиля: два стандартных матричных профиля – $P(X,Y)$ и $P(Y,X)$ (и соответствующие им индексы), и два дополнительных матричных профиля – $P(X,X)$ и $P(Y,Y)$ (и соответствующие им индексы).

Каждый временной ряд может быть сопоставлен с набором типовых фрагментов (то есть – структурных элементов) Π . А это значит, что для каждого временного ряда необходимо строить свои собственные четыре матричных профиля: четыре матричных профиля для временного ряда X – $P(X,\Pi)$, $P(\Pi,X)$, $P(X,X)$ и $P(\Pi,\Pi)$, и четыре матричных профиля для временного ряда Y – $P(Y,\Pi)$, $P(\Pi,Y)$, $P(Y,Y)$ и $P(\Pi,\Pi)$. Особый интерес представляет матричный профиль $P(\Pi,\Pi)$, который встречается в

обоих наборах. Это профиль отражает (вместе с соответствующим ему индексом) результаты препроцессинга набора типовых фрагментов П.

Если теперь построить иерархию типовых фрагментов, упорядоченную по степени сложности внутренней «структуры близости», то можно будет, начиная с временных рядов, имеющих относительно простую «структуру близости», восходить вверх по иерархии и получать описание «структуры близости» каждого временного ряда. Таким образом, сравнительный анализ двух заданных временных рядов сводится к построению последовательности «движений».

4. Комплексная обработка разнотипных экспериментальных данных

Для эффективной диагностики БП используется целая система *функциональных тестов*. Во-первых, здесь сравнивается между собою то, как испытуемый удерживает *минимальный* уровень усилия, и то, как испытуемый удерживает *максимальный* уровень усилия. Во-вторых, здесь сравнивается между собою то, как испытуемый удерживает усилие при помощи только кончиков пальцев (то есть тогда, когда многокольцевая система задействована в минимальной степени), и то, как испытуемый удерживает усилие при помощи вытянутых рук (то есть тогда, когда многокольцевая система задействована в максимальной степени). В результате, каждый объект представляется в виде набора из восьми различных временных рядов, образующих четыре пары парных (друг другу) временных рядов. Другими словами, в нашем распоряжении имеется четыре различных (*стандартных*) функциональных теста:

1. Тест для кончиков пальцев при минимальном уровне удерживаемого усилия.
2. Тест для кончиков пальцев при максимальном уровне удерживаемого усилия.
3. Тест для вытянутых рук при минимальном уровне удерживаемого усилия.
4. Тест для вытянутых рук при максимальном уровне удерживаемого усилия.

При этом каждый из четырёх функциональных тестов представляется двумя парными ТТТ (соответственно, всего будет ровно восемь различных временных рядов). Таким образом, каждый объект будет описываться при помощи четырёх различных внутриобъектных расстояний. Отсюда вытекает задача построения классификации объектов, которая основывается на *внутриобъектных* расстояниях.

Эта задача может быть решена непосредственно, если рассматривать в качестве классов классы взаимного расположения четырёх числовых значений. Действительно, существует три возможных варианта взаимного расположения двух значений, а именно $x_1 > x_2$, $x_1 = x_2$ и $x_1 < x_2$. Соответственно, в случае $x_1 = x_2$ имеется только *одно* уникальное значение, а это значит, что для величины x_3 будет (опять же) три различных варианта: $x_3 > x_1 = x_2$, $x_1 = x_2 = x_3$ и $x_1 = x_2 < x_3$; в то же время, в случае $x_1 > x_2$ и в случае $x_1 < x_2$ будут уже *два* уникальных значения, а это значит, что будет иметься ровно 5 различных допустимых вариантов взаимного расположения. Всего в совокупности будет, очевидно, 13 различных допустимых вариантов взаимного расположения *трёх* значений. Поступая аналогичным образом, можно получить 75 различных допустимых вариантов взаимного расположения уже *четырёх* значений. Следует заметить, что эти классы (построенные для каждого фиксированного количества значений) допускают естественное упорядочивание таким образом, что *первый* класс (или класс 1) всегда соответствует *убывающей* последовательности попарно различных значений, в то время как *последний* класс (или класс 75 для набора, состоящего из четырёх значений) – *возрастающей* последовательности попарно различных значений. Представляется целесообразным нормировать порядковые номера классов таким образом, чтобы *минимальный* класс (соответствующий строго монотонно *убывающей* последовательности значений) обозначался значением (-1),

«нейтральный» класс (соответствующий постоянной последовательности типа $x_1 = x_2 = x_3$) – значением 0, а *максимальный* класс (обозначающий строго монотонно возрастающую последовательность значений) – значением (+1). При таком подходе близкие друг другу классы (получаемые для наборов, составленных из различного числа значений) будут иметь и близкие друг другу числовые обозначения. Кроме того, противоположные друг другу (по структуре) классы будут иметь *противоположные* числовые обозначения (хотя и те же значения по абсолютной величине).

Классификация ТТГ заключается в том, чтобы представить каждый объект (то есть – набор временных рядов) в виде набора из четырёх *внутриобъектных* расстояний (а на деле – расстояний между парными друг другу ТТГ). Непосредственная классификация описанным выше способом является *первичной* в том смысле, что здесь учитывается только взаимное расположение отдельных значений, но не сами значения. Для того, чтобы учесть эти значения (то есть, чтобы учесть и то, насколько одно значение больше или меньше другого), необходимо рассматривать ещё и отношения, имеющиеся между различными значениями. В результате можно получить новую классификацию, которую следует называть уже *вторичной* (по отношению к исходной, первичной классификации).

Заключение

До настоящего времени основное внимание уделялось разработке методов математического анализа отдельных временных рядов. В то же время при диагностике БП значительный интерес представляет анализ содружественных движений, в результате регистрации которых получаются парные ТТГ. Соответственно, возникает новое направление исследований. Проведённый в работе анализ ситуации, формулировка основной задачи и обзор предполагаемых подходов к решению сформулированной задачи, по сути представляют новое перспективное направление исследований.

Для структурного анализа временных рядов оказалось плодотворным понятие матричного профиля (Matrix Profile) [8]. Прежде всего, матричный профиль позволяет находить «мотивы» (motifs) – пары наиболее близких друг другу фрагментов (относительно коротких под-последовательностей) одного и того же временного ряда. Кроме того, матричный профиль позволяет находить и т.н. «выбросы» – пары наиболее далёких друг другу фрагментов [9]. Матричный профиль строится для фиксированной длины фрагментов. Структурный анализ временных рядов заключается в построении матричных профилей для различных длин фрагментов и перечислении всех найденных «мотивов». Структурный анализ парных временных рядов и особенно ТТГ заключается в том, чтобы выделять повторяющиеся в обоих временных рядах структурные элементы. Для этого необходимо строить матричные профили с ограничениями на поиск ближайших соседей. Основная трудность в нахождении ближайшего соседа заключается в том, что в окрестности каждого фрагмента находятся «следы» как текущих, так и прошлых коррекций. В результате, временные ряды оказываются раскладываемыми на наборы цепочек структурных элементов, которые довольно сильно перемешиваются друг с другом. Здесь, очевидно, нужно использовать подход, основанный на понятии *цепочки*, представляющей собою последовательность фрагментов, каждая последовательная пара которых – это пара близких друг другу фрагментов [10]. В соответствии с этим представляется целесообразным использовать инструмент матричного профиля для глубокого структурного анализа парных ТТГ. Применение матричного профиля позволит оценить степень локального сходства/различия парных ТТГ, а выделяемые из парных ТТГ цепочки позволят описать соответствующие им классы объектов.

Наиболее полный анализ парных ТТГ возможен, строго говоря, с привлечением динамического подхода, когда каждый временной ряд рассматривается как результат работы некоторого «источника». В соответствии с этим представляется целесообразным строить и исследовать всевозможные марковские модели ТТГ со скрытыми состояниями. Основное отличие этих моделей от традиционных заключается в том, что новые модели должны ещё учитывать и различные функциональные тесты (для различных функциональных тестов должны строиться свои собственные модели), и различные способы удержания усилия (для различных классов должны строиться, очевидно, свои собственные модели). В этом смысле постепенное развитие БП можно будет описать в виде последовательного изменения (усложнения или упрощения) модели удержания усилия. В соответствии с этим основная задача анализа парных ТТГ – это задача идентификации марковских моделей.

Исследование выполнено в рамках проекта FFZF-2022-0003.

Литература

1. **Антонен Е.Г.** Паркинсонизм: (патогенез, клиника, диагностика, лечение). / М-во образования и науки Рос. Федерации, Пет-розавод. гос. ун-т. – Петрозаводск: Издательство ПетрГУ, 2014. – 140 с.
2. **Крыжановский Г.Н., Карабань И.Н., Магаева С.В., Карабань Н.В.** Компенсаторные и восстановительные процессы при паркинсонизме [Текст] =: монография. – Киев: Институт геронтологии АМН Украины, 1995. – 186 с.
3. **Антонен Е.Г.** Немоторные и дополнительные моторные расстройства при паркинсонизме: учебное пособие для студентов 4-6-х курсов специальностей 060101 «Лечебное дело» и 060103 «Педиатрия». / М-во образования и науки Рос. Федерации, Петрозавод. гос. ун-т. – Петрозаводск: Издательство ПетрГУ, 2015. – 79 с.
4. **Романов С.П., Якимовский А.Ф., Пчелин М.Г.** Метод тензометрии для количественной оценки тремора // Физиологический журнал им. И.М. Сеченова. – 1996. – Т. 82, № 2. – С. 118–123.
5. **Романов С.П., Пчелин М.Г., Якимовский А.Ф.** Характеристики изометрически регистрируемого тремора при поражении экстрапирамидной системы // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. – 1997. – Т. 83, № 3. – С. 133–139.
6. **Бернштейн Н.А.** О построении движений. – М. 1947.
7. **Zhvalevsky O.V.** Paired tenzotremorogramms structure similarity analysis based on time series distance functions: problem formulation» // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 1864. – Pp. 012091.
8. Matrix Profile page <https://www.cs.ucr.edu/~eamonn/MatrixProfile.html>
9. **Yeh C.-C. M., Zhu Y., Ulanova L., Begum N., Ding Y., Dau A., Silva D., Mueen A., Keogh E.** Matrix Profile I: All Pairs Similarity Joins for Time Series: A Unifying View That Includes Motifs, Discords and Shapelets.
10. **Zhu Y., Imamura M., Nikovski D., and Keogh E.** Matrix Profile VII: Time Series Chains: A New Primitive for Time Series Data Mining.