

УДК 537.86+616-079

В. В. Бороноев**РАЗРАБОТКА РАДИОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ
ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА ПО ПАРАМЕТРАМ
ПУЛЬСОВОЙ ВОЛНЫ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
ДЛЯ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ (Часть 1)**

Разработка радиофизических методов функциональной диагностики организма человека по параметрам пульсовой волны и технических средств для их реализации с целью объективизации и автоматизации метода диагностики заболеваний по пульсу относится к одному из научных направлений изучения наследия тибетской медицины. Отмечено, что характерными особенностями пульсовой диагностики являются экспрессность, высокая информативность, простота и индивидуальный подход к пациенту. С ее помощью одновременно исследуются двенадцать внутренних органов и оценивается функциональное состояние человека в целом. Приведена краткая историческая справка о роли метода диагностики по пульсу в европейской и тибетской медицине. Представлен краткий обзор результатов исследований метода диагностики заболеваний по пульсу в лаборатории пульсовой диагностики Отдела физических проблем Бурятского научного центра (ныне лаборатория волновой диагностики живых систем Института физического материаловедения) Сибирского отделения РАН. Отмечено, что созданы научно-технические основы метода диагностики и разработаны аппаратно-программные средства, удовлетворяющие требованиям диагностики заболеваний по пульсу в тибетской медицине. Обоснован метод диагностики состояния организма по пульсу в традиционных точках пальпации на лучевой артерии руки человека инструментальными средствами.

Ключевые слова: пульсовая диагностика, тибетская медицина, пульс, объективизация, автоматизация.

V. V. Boronoev**THE DEVELOPMENT OF RADIOPHYSICAL METHODS
OF FUNCTIONAL DIAGNOSTICS OF HUMAN ORGANISM
ACCORDING TO THE PULSE WAVE PARAMETERS
AND TECHNICAL MEANS
OF THEIR IMPLEMENTATION (PART 1)**

The objectivation and automation of pulse diagnostics is one of the scientific trends in the study of Tibetan medicine heritage. It has been noted that the characteristic features of pulse diagnostics are its express character, high information density, simplicity and individual approach to a patient. This method makes it possible to investigate the state of twelve inner organs and to evaluate the general condition of a patient's health. Short information on the history and the role of pulse diagnostics in European and Tibetan medicines is given here. The article presents a short review of study results of the method of pulse diagnostics of diseases in the laboratory of pulse diagnostics of the Department of Physical Problems of the Presidium of the Buryat Scientific Center of the Siberian Division of the Russian Academy of Sciences. It is noted that the scientific and technical foundations of the diagnostics method were created; hardware and

software meeting the requirements of pulse diagnostics in Tibetan medicine were developed. The method of diagnostics of organism condition by pulse in traditional palpation points on a beam artery of a hand of the person was substantiated by tool means.

Key words: pulse diagnostics, Tibetan medicine, pulse, objectivation, automation.

Диагностика заболеваний по пульсу и ее место в европейской и тибетской медицине

Введение

Тибетская медицина – одна из древнейших традиционных медицинских систем, вобравшая в себя достижения народной медицины многих сопредельных стран Востока. Она представляет собой стройную систему знаний, проверенную более чем тысячелетним опытом и не потерявшую своей самобытности до наших дней. Этими обстоятельствами объясняется возрастающий в последние годы интерес к ней во всем мире.

В спектр научных направлений по изучению наследия тибетской медицины входит диагностика заболеваний по пульсу, имеющая большие возможности для адаптации к современному уровню развития технических средств. Это связано с тем, что она оперирует разнообразностью пульсовых сигналов, непосредственно и с большой точностью регистрируемых современной измерительной аппаратурой. Для анализа пульсовых колебаний можно привлечь математический аппарат обработки сигналов, созданный к настоящему времени. Кроме того, являясь одним из основных диагностических методов в тибетской медицине, пульсовая диагностика располагает обширной базой знаний по распознаванию различных психосоматических нарушений в организме человека, причем эта база хорошо организована, поддается формализации и последующей компьютеризации.

Характерными особенностями диагностики состояния организма по пульсу являются экспрессность, высокая информативность, простота и индивидуаль-

ный подход к пациенту. С ее помощью одновременно исследуются двенадцать внутренних органов и оценивается функциональное состояние человека в целом. При этом возможна как интегральная, так и дифференциальная, по системам внутренних органов, диагностика заболевания. Таким образом, пульсовая диагностика, поставленная на инструментальную основу, могла бы стать необходимым дополнительным инструментом для практической медицины.

В настоящее время ведутся работы, направленные на объективизацию и автоматизацию пульсовой диагностики состояния организма человека в таких странах, как КНР [22; 32], Франция [28], Южная Корея [29], США [26], Россия [8; 20; 30; 33] и др. Это связано с отсутствием в арсенале западной медицины относительно дешевых приборов для оперативной интегральной оценки функционального состояния нескольких внутренних органов человека, а существующие (ультразвуковое исследование, различные виды томографии и др.) дорогостоящи, не предназначены для массового обследования населения и выявления доклинических (ранних) изменений в функционировании органов. К тому же главная характерная черта всего инструментального диагностического парка заключается в том, что процедура постановки диагноза болезни реализуется в них последовательно, а не параллельно и поэтому требует длительного временного отрезка для обследования пациента.

Краткая историческая справка

Первые сведения об использовании пульса для диагностики состояния организма опубликованы в руководствах по китайской медицине. Принято считать [6; 34], что первым методом диагностики

болезней по пульсу использовал в своей практике врач Бянь Цяо, живший в V веке до н. э. и описавший его в книге «Нан-цзин».

В дальнейшем [34] диагностика болезней по пульсу уже рассматривается как эффективный метод распознавания болезней и описывается или подразумевается почти во всех трактатах китайской медицины. Прежде всего это касается «Нэй-цзин» (Книга о внутреннем, III в. до н. э.), обобщившей огромный опыт врачевания за несколько веков и считающейся каноном китайской медицины. Первой специальной работой, посвященной пульсовой диагностике, считают трактат «Мо-цзин» (Книга о пульсе, III в.), написанный крупнейшим китайским врачом Ван Шу-хэ, который до сих пор является источником и отправным пунктом всех исследований в данной области.

Можно привести еще ряд трактатов, в которых изложены основы пульсодиагностики. Это сочинение Ян-шеня «Мо-цзэшэ» (Секреты пульса), руководство по пульсодиагностике «Бинь-хао Мосюэ» (XVI в.), где описаны 27 разновидностей пульса, а также специальная работа врача Ши Фа «Ча-шин Чжи-нан» (XIII в.) по диагностике болезней с описанием 33 разновидностей пульса и их графическим изображением.

В настоящее время самым популярным руководством для китайских врачей по пульсовой диагностике является [6] пятитомный сборник «Исправление некоторых объяснений к книгам по секретным знаниям о пульсе», составленный по материалам нескольких древних трактатов.

Очевидно [34], что опубликованных работ, в которых имеется описание пульсодиагностики, значительно больше, чем мы здесь указали. Однако упомянутых работ достаточно для того, чтобы получить представление о роли и значении метода диагностики по пульсу в китайской медицине.

Европейская медицина также имеет давние традиции применения пальпаторного исследования пульса. Еще в IV в. до н. э. Гиппократ первым ввел в медицинскую практику выражение «сфигмос» (пульс) и описал его характерные признаки. Это учение получило еще большее развитие в медицине Древнего Рима, особенно в трудах Галена (II в.), который предложил сложную систему ощупывания пульса лучевой артерии и различал 27 его видов, многие названия из которых сохранились и в современной медицине. В дальнейшем Авиценна, обогатив античные традиции опытом китайской пульсодиагностики, способствовал распространению этого метода в странах Ближнего и Среднего Востока и в Европе [10]. Он описал 48 видов пульса, 35 из которых позаимствовал из китайской медицины. Но наиболее высокого уровня развития пульсовая диагностика болезней достигла в тибетской медицине [7; 14; 15; 17].

Пульсовая диагностика заболеваний в европейской медицине

Исторически сложилось так, что, несмотря на глубокие корни изучения пульсовой диагностики в европейской медицине, учение о видах пульса, о соответствии и несоответствии пульса определенному заболеванию не получило особенного развития вследствие того, что методы ручного ощупывания пульса были недостаточно формализованы и часто допускали неоднозначную интерпретацию. Поэтому европейская медицина, имея в своем арсенале обширный экспериментально-диагностический материал, полученный методом пальпации, начиная с XIX в., пошла по пути развития графических методов регистрации пульсовой волны, которые являются узкоспециальными методами изучения некоторых частных особенностей функционирования сердечно-сосудистой системы (ССС). К числу таких методов исследования пульса, в первую очередь, относится сфигмография – метод графиче-

ческой регистрации пульсовой волны. С дальнейшим развитием техники, особенно радиоэлектроники, развивались и другие неинвазивные методы исследования пульса – флебография, плетизмография, осциллография и т. д. Однако в практической медицине чаще других методов используется сфигмография, достоинствами которой являются информативность, простота регистрации и комфортность для пациента.

К сожалению, сфигмография не вошла в клиническую практику в том объеме, какими представляются ее диагностические возможности. Так, сфигмограммы (СФГ) центрального и периферического пульсов используются для определения скорости распространения пульсовой волны, которая характеризует упругое напряжение сосудистых стенок и является одним из наиболее надежных показателей их упруго-вязкого состояния. СФГ центрального пульса в комплексе поликардиографического исследования ССС позволяет проводить анализ фаз левого желудочка и тем самым оценить насосную функцию сердца. Кроме этого, анализ изменения сфигмограммы (синоним – пульсограмма) позволяет дополнить диагностику некоторых заболеваний ССС [11].

Исследуя пульс, современный врач определяет следующие его основные свойства: частоту, ритмичность, напряжение, наполнение и др., скорость пульсовой волны; кроме того, сравнивая пульс на двух руках, обращает внимание на синхронность пульса на обеих руках, на соответствие или различие его свойств.

Следует подчеркнуть, что современная медицина различает некоторые виды пульса, названия многих из них были введены Галеном и сохранились в ней до настоящего времени (твердый, медленный, скорый, дикротический, анакротический, астенический, монократический), причем каждому из приведенных видов ставится в соответствие определенная форма пульсограммы. В. Вогралик [6] добавляет, что по определенной совокупности

свойств различаются некоторые особые виды пульса, такие как скачущий пульс, альтернирующий пульс и др. Общепринятым положением является то, что для определенных заболеваний характерен особый [Там же] вид пульса (большой, скачущий при недостаточности клапанов аорты; дикротический пульс, при брюшном тифе и т. д.). Н. И. Пирогов описал особенности пульса при травматическом шоке: «Пульс как нитка и с частыми пережатками». Однако это научное направление в современной медицине не имеет большого веса [Там же] и не получило серьезного научного развития.

Состояние исследований метода диагностики заболеваний по пульсу в тибетской медицине

Изучение тибетской медицины европейскими исследователями было начато около 200 лет тому назад – это русский ученый И. Реман, венгр Кереси Чома и многие другие, результаты исследований которых впоследствии оформились в целое научное направление [31]. При изучении тибетской медицины исследователи столкнулись с рядом трудностей, обусловленных в первую очередь тем, что язык тибетской медицины во многом еще остается не исследованным, а сам феномен тибетской медицины исследователи часто пытаются перенести в рамки привычных им систем, пренебрегая положением о единстве формы и содержания. Результаты налицо. Из всех методов диагностики тибетской медицины за 200 лет ее изучения в практику современной медицины не введен ни один, хотя большинство исследователей признает их высокую информативность [Там же]. Не лучше обстоят дела с внедрением методов лечения и лекарственных средств.

К основным работам, которые содержат сведения о пульсовой диагностике и являются переводами основного медицинского трактата тибетской медицины «Чжуд-ши» и комментария к нему «Вайдурья-онбо», относятся работы П. А. Бадмаева [2], Д. Ульянова [16], А. М. Позднеева [14], Ф. Мейера [27], Э.

Финк [25], [23; 24]. В них описаны точки исследования пульса, техника пальпации, критерии нормального пульса, патологические изменения пульса и соответствующие им болезни и т. д., а также дан краткий обзор научных исследований, проводимых в различных странах мира.

Тем не менее к началу работ по проблеме объективизации пульсовой диагностики нам не была известна ни одна работа, в которой был бы осуществлен научный анализ оригинальных руководств. Такой анализ предполагает, прежде всего, исследование структурных, функциональных и концептуальных особенностей оригинала, его перевод, толкование и интерпретацию трудных для понимания мест, с тем чтобы сделать текст трактата доступным для восприятия современному читателю [34]. Эта большая работа была начата в лаборатории пульсовой диагностики Н. Ц. Жамбалдагбаевым и В. Н. Пупышевым, поскольку для проведения серьезных научных исследований по объективизации и автоматизации пульсовой диагностики необходимо подведение под нее **солидной** источниковедческой базы, а при наличии экспертов, специалистов по пульсодиагностике – разработки специальных методов работы с ними. Именно на такого рода исследования и были ориентированы работы по источниковедению, первый этап которых обобщен в цикле статей и монографий [7; 15; 20; 31; 33; 34].

Остановимся более детально на информативности пульса в тибетской медицине, поскольку его исследование занимает особое место, и, как отмечает Ф. Мейер [27], тибетские медики в практике зачастую обходятся только им. Анализ письменных источников по пульсодиагностике показывает ее широкие возможности для получения информации о состоянии человеческого организма. Опытный диагност по пульсу может различать до 360 показателей.

Но извлечение этой информации средствами современной радиоэлектро-

ники сопряжено с большими трудностями, связанными с разработкой и изготовлением не только датчиков пульса, имитирующих действия трех пальцев врача, но и целого комплекса аналого-цифровой аппаратуры, предназначенной для регистрации пульсограмм с помощью шести датчиков пульса, устанавливаемых на лучевой артерии запястья руки пациента с их последующим анализом. Дело в том, что врач-пульсодиагност работает как бы в диалоговом режиме: варьируя силу нажима и участок соприкосновения подушечек пальцев попеременно на левой и правой или одновременно на лучевых артериях обеих рук пациента, он поочередно «опрашивает» 12 внутренних органов (сердце, тонкая кишка, легкие, толстая кишка, селезенка, желудок, левая почка, половые органы, печень, желчный пузырь, правая почка, мочевой пузырь); результаты «опроса» соотносит с «врожденным пульсом» пациента и с учетом сезонных и суточных особенностей пульса выносит заключение о состоянии его организма. При необходимости он уточняет и проверяет свое предварительное заключение путем опроса и осмотра и в случае их совпадения устанавливает окончательный диагноз [15; 7]. В случае же интерпретации пульсограмм, записанных техническими средствами, задача усложняется еще и тем, что необходимо формализовать знания по пульсодиагностике и выбрать или создать оптимальные алгоритмы обработки пульсограмм.

Эта задача представляется нам выполнимой, поскольку метод диагностики болезней по пульсу в тибетской медицине является детально разработанным. Такой вывод можно сделать из описания основных положений и правил пульсодиагностики [7; 15; 17]. Здесь мы только перечислим их, не раскрывая содержания: 1) подготовка больного и врача; 2) выбор времени обследования пульса; 3) место обследования пульса; 4) мера нажатия на лучевую артерию; 5) техника обследования пульса; 6) основные типы пуль-

са («врожденные пульсы»); 7) пульсы четырех сезонов и пяти стихий; 8) семь удивительных пульсов; 9) определение состояния здоровья по количеству ударов пульса; 10) общие и специфические пульсы; 11) пульсы смерти; 12) пульсы нервно-психических заболеваний («злых духов»); 13) пульс продолжительности жизни. Краткое изложение и обоснование некоторых положений и правил в контексте физического и физиологического обоснования методики измерения пульсовой волны представлено в [3].

Необходимо помнить, что важнейшая отрасль медицинской науки – диагностика была органически связана с существовавшими в тибетской медицине понятиями о больном и здоровом организме. Диагноз болезни формировался в понятиях и терминах принятой в Тибете классификации болезней. Специфичность системы тибетской медицины и отсутствие идентификации ее понятийного аппарата с понятиями современной медицины затрудняет анализ опубликованных материалов. Поэтому выяснение и расшифровка основополагающих в тибетской медицине понятий, таких как «махабхуты», «дхату», «три начала», множества различных «каналов энергии» и т. д., позволит, на наш взгляд, получить «ключ» к разгадке основ пульсовой диагностики.

Таким образом, для большинства исследователей во многих странах мира становятся очевидными значительные потенциальные возможности пульсовой диагностики восточной медицины, что, естественно, будет стимулировать проведение дальнейших исследований; решение проблемы объективизации и автоматизации пульсовой диагностики возможно при наличии разработанной методологии поиска этого решения, основанного на критическом анализе древних медицинских трактатов, специальных датчиков пульса с системой крепления, не вносящей артефакты, и компьютеризованных диагностических методик. Кроме того, необходим союз исследова-

телей разных специальностей (врачей, физиологов, тибетологов, филологов, физиков, математиков, программистов и т. д.); все проводимые исследования относятся к изучению пульсовой диагностики с позиций теории китайской традиционной медицины и практически нет работ по изучению этой проблемы с позиций тибетской медицины; можно предположить, что автоматизированные пульсодиагностические комплексы, сочетающие современную приборную базу и компьютеризованные диагностические методики, будут иметь устойчивый спрос как объективные и в достаточной мере интеллектуальные.

1. Пульсовая диагностика заболеваний в тибетской медицине Инструментальный подход

Комплексные исследования по объективизации и автоматизации пульсовой диагностики функционального состояния человека по канонам тибетской медицины были начаты в лаборатории пульсовой диагностики (ЛПД) Отдела физических проблем Бурятского научного центра Сибирского отделения РАН в 1983 г. Отличительной чертой развиваемого в ЛПД подхода к изучаемой проблеме является его явно выраженный междисциплинарный характер, предполагающий наряду с физической интерпретацией основных положений пульсовой диагностики и созданием интеллектуального информационно-вычислительного диагностического комплекса более широкий спектр исследований в области источниковедения и теории тибетской медицины.

Такой подход к проблеме предопределил три основных направления исследований лаборатории: 1) информационные и экспертные диагностические системы тибетской медицины; 2) объективизация и автоматизация пульсовой диагностики; 3) объективизация биологически активных точек (БАТ) тибетско-монгольской медицины и разработка на их основе электропунктурного метода диагности-

ки. Конечная цель исследований – создание интеллектуального информационно-вычислительного диагностического комплекса тибетской медицины, представляющего собой синтез автоматизированного пульсодиагностического комплекса (АПДК) с экспертной диагностической системой (ЭДС). Основное назначение комплекса – имитация действий и мышления тибетского врача в течение всего цикла лечебного процесса: диагностика – нозология – лечение. При этом первое направлено на реализацию двух методов постановки диагноза – опроса и осмотра – с помощью экспертной диагностической системы. Второе – на реализацию метода диагностики по пульсу – ощупывания. Постановка диагноза по БАТ выполняет функцию контрольного способа диагностики, основанного на другой методологической платформе.

В рамках представленного обзора, состоящего из двух частей, остановимся на результатах исследований второго направления лаборатории по объективизации и автоматизации пульсовой диагностики заболеваний в тибетской медицине.

1.1. Инструментальный метод оценки функционального состояния человека по пульсу

Как отмечено в [26], к моменту начала работ по данной проблеме не были объяснены на основе современной науки, в том числе физики и физиологии, принципы пульсовой диагностики и теоретические предпосылки, на которых она базируется. Поэтому, чтобы приблизиться к пониманию существа феномена диагностики состояния организма человека по пульсу, необходимо раскрыть физический смысл основных пульсирующих сущностей, постулируемых тибетской медициной как *ветер* (rlung), *желчь* (mkhris) и *слизь* (bad kan). Раскрытие смысла данных понятий позволит изучить и освоить не только и не столько пульсовую диагностику, сколько теорию и практику тибетской медицины в целом.

Известно, что имеющаяся медицинская литература с описанием (в аллегорической форме) различных видов пульса и атлас с их графическими изображениями представляет пульсовую диагностику состояния организма в тибетской медицине как тщательно разработанный метод диагностики, основанный на анализе таких параметров пульса, как частота, сила удара, наполненность сосуда, характер чередования сильных и слабых тонов и т. д., которые могут быть зарегистрированы современной электронной аппаратурой. Регистрация пульсовых сигналов и последующая идентификация их с тем или иным типом пульса, характеризующим конкретный вид заболевания по классификации тибетской медицины, позволит приступить к созданию аппаратно фиксируемых пульсовых сигналов (каталога пульсов) и, в первую очередь, пульсов физиологической нормы и патологии, пульсов болезней *жара* и болезней *холода*; *ветра*, *желчи* и *слизи*.

Конкретизируя проблему, можно сказать, что в первую очередь необходимо предложить физическое и физиологическое обоснование основных положений пульсовой диагностики заболеваний в тибетской медицине, разработать и создать автоматизированный пульсодиагностический комплекс и внедрить его в практическое здравоохранение.

При этом решаются следующие задачи: обоснование возможности инструментального решения проблемы объективизации и автоматизации пульсовой диагностики заболеваний по традиции тибетской медицины, экспериментальная проверка ее основных эмпирических правил; развитие или адаптация методов математического анализа сигналов, позволяющих проводить обработку пульсовой волны в квазиреальном масштабе времени; выбор и обоснование способа регистрации пульсовой волны, создание автоматизированного пульсодиагностического комплекса (АПДК); исследование амплитудно-временных и статисти-

ческих характеристик пульсовой волны радиофизическими методами, установка их диагностической значимости; разработка статистических моделей пульсов физиологической нормы и патологии, пульсов болезней жара и холода и пульсов фаз дыхательного цикла (*выдоха, паузы, вдоха*); создание классов аппаратно фиксируемых пульсовых сигналов (каталога пульсов), соответствующих нозологическим формам в тибетской медицине; изучение свойств пульсовой волны как физического процесса; исследование иерархии волновых процессов в сердечно-сосудистой системе организма человека; изучение прикладных аспектов применения метода диагностики болезней по пульсу в клинической практике.

1.1.1. Математические методы анализа пульсовой волны

Решение задачи автоматизации медицинской диагностики возможно при наличии надежных, устойчивых методов выделения и анализа диагностически значимых характеристик физиологических сигналов. В качестве таковых можно рассматривать их амплитудно-временные характеристики. Такой анализ дает достаточное количество информации для определения критериев постановки диагноза, поскольку протекание любого физиологического процесса, регистрируемого в виде электрического сигнала, напрямую связано с теми или иными характерными свойствами этого сигнала в пространстве анализируемых параметров (амплитуда, фаза, геометрия контура).

Амплитудные и временные характеристики сигнала однозначно определяются набором некоторых характерных точек, являющихся экстремумами и точками перегиба кривой сигнала. Задача корректного определения характерных точек облегчается свойством производной функции, согласно которому производная меняет знак в точке экстремума функции и направление в точке перегиба. Следовательно, существуют необхо-

димые предпосылки для создания процедуры автоматизированного определения характерных точек, основанной на вычислении и анализе первой и второй производных сигнала.

Алгоритм анализа пульсовой волны состоит из четырех блоков: 1) блок фильтрации, 2) блок выделения характерных (информативных) точек пульсовой волны и определения их координат, 3) блок формирования амплитудно-временных рядов и 4) блок статистической обработки.

Включение последнего блока продиктовано необходимостью последующей оценки достоверности выводов по отнесению пульсовой волны к тому или иному виду пульса (*мужской, женский, средний; пульс жара или холода; пульс ветра, желчи и слизи*), полученных при сравнении реализации пульсовой волны с ее математической моделью. При этом информация, полученная на статистическом этапе из экспериментов, позволит провести не только качественную, но и количественную оценку разрабатываемых математических моделей пульса и оценить возможные пределы вариабельности основных параметров этой модели при переходе от одного типа пульса к другому.

Фильтрация пульсового сигнала осуществлялась цифровым фильтром текущего усреднения, основанного на скачущем движении фильтрующего окна – «шагового скользящего окна» (ШСО). Этот алгоритм является дальнейшим развитием классического алгоритма фильтрации «скользящего окна» (скользящего среднего) и предназначен для выделения низкочастотных составляющих исследуемого пульсового сигнала с периодом 5 и более секунд. Потери фильтрации при таком скачущем движении «скользящего окна» компенсировались применением цифровой линейной интерполяции. Предложенный алгоритм ШСО, обладая такой же эффективностью фильтрации, как и классический алгоритм, повышает, по сравнению с ним, быстродействие на два порядка и, кроме того, имеет резервы

для увеличения быстродействия фильтрации, что позволило проводить обработку импульсного сигнала в реальном масштабе времени [9].

Устойчивый способ выделения характерных точек импульсной волны основан на численном дифференцировании сигнала методом регуляризации А. Н. Тихонова. Учитывая, что импульсный сигнал представляет собой результат наложения периодического и ряда случайных процессов, обусловленных влиянием различных физиологических и аппаратурных факторов, в проводимых численных расчетах в качестве исходной была выбрана функция [5]:

$$u_{\delta}(x) = b_0/2 + \sin(x) + \chi(x),$$

где $\chi(x)$ – случайная функция с нормальным законом распределения, нулевым средним и дисперсией σ^2 ; $b_0/2$ – уровень изолинии.

С учетом введенных обозначений задача восстановления первой и второй производных экспериментально записанного сигнала $u_{\delta}(x)$ представлена в виде уравнения:

$$\int_a^b K(x,s)z(s)ds = u_{\delta}(x).$$

В случае восстановления первой производной $z(x) = u'(x)$ ядро имеет вид

$$K(x,s) = \begin{cases} b-x, & \text{при } a \leq s \leq x \leq b \\ b-s, & \text{при } s > x \end{cases},$$

а в случае нахождения второй производной $z(x) = u''(x)$

$$K(x,s) = \begin{cases} x-s, & \text{при } a \leq s \leq x; \\ 0, & \text{при } x < s \leq b. \end{cases}$$

Численные расчеты показали, что для входного сигнала $u_{\delta}(x)$ (при уровне изолинии $b_0/2 = 0$ и величине среднеквадратичного отклонения $\sigma = 0,04$ – типичном уровне погрешности эксперимента), первая и вторая производные будут определяться с погрешностью, в обоих

случаях не превышающей значения 0,01. Погрешность определения характерных точек импульсной волны представлена на рисунке 1.

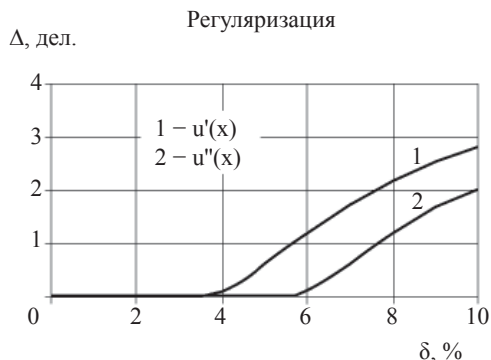


Рис. 1. Погрешность выделения характерных точек импульсной волны

В качестве других способов выделения характерных точек импульсной волны использовались методы, основанные на применении интерполирующих сплайнов разных порядков – кубических и локальных В-сплайнов. Постановка задачи, решение и вычислительные процедуры для кубических сплайнов в контексте обработки импульсной волны изложены в [21]. Ниже рассмотрены некоторые вопросы практической реализации метода локальных В-сплайнов, алгоритм которого любезно предоставлен автору И. И. Орловым (ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск) [12].

Пусть $x(t)$ – непрерывный аналог экспериментального импульсного сигнала, рассматриваемого после дискретизации как сеточная функция $x_k = x(t_k)$, $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$; N – длина реализации в отсчетах. Интерполяционную формулу функции $x(t)$ можно записать следующим образом [12]:

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} b_k B(t-k), \quad (1)$$

где $B(t)$ – локальные В-сплайны вида:

$$B(t) = \frac{1}{16} \left\{ (t + \frac{3}{2})_+^2 - 3(t + \frac{1}{2})_+^2 + 3(t - \frac{1}{2})_+^2 - (t - \frac{3}{2})_+^2 \right\}. \quad (2)$$

Подстрочный символ + в (2) означает, что степень равна 0 при отрицательных значениях аргумента. Свойства введенной сплайн-функции $B(t)$ следующие: имеет финитный носитель (ограниченную область определения) наименьшей длины $- [-3/2, 3/2]$; неотрицательна на нем (является четной функцией своего аргумента); непрерывна и имеет непрерывную первую производную; вторая производная является кусочно-постоянной функцией.

Предполагается [12], что коэффициенты b_k являются линейными комбинациями трех ближайших значений временного ряда x_k :

$$b_k = c_{-1} x_{k-1} + c_0 x_k + c_1 x_{k+1}. \quad (3)$$

Коэффициенты c_j , где $j = -1, 0, 1$, ввиду локальности сплайна, не зависят от значений функций x_k в узлах сетки; исходя из требований минимизации погрешности приближения функции сплайном второй степени, они принимают следующие значения [12]:

$$c_{-1} = c_1 = -1, \quad c_0 = 10. \quad (4)$$

Для вывода расчетных формул на каждом из целочисленных участков (с концами в полуцелых точках) в [12] принято: $t = p + \xi$, $\xi \in [-1/2, 1/2]$, $p = 0, 1, \dots, N-1$. В этом случае непрерывная функция $x(t)$ на p -м участке разбиения, ввиду локальности В-сплайна, может быть представлена через его значения в трех соседних узлах сетки в виде:

$$x(p + \xi) = x_p(\xi) = b_{p-1} B(1 + \xi) + b_p B(\xi) + b_{p+1} B(\xi - 1), \quad (5)$$

в которой В-сплайны являются многочленами второй степени.

Далее, из формул (5) и (2) для функции $x(t)$ на p -м интервале сетки получено выражение:

$$x_p(\xi) = a_0 + a_1 \xi + a_2 \xi^2, \quad (6)$$

для которого коэффициенты a_0 , a_1 и a_2 имеют вид:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{64} (b_{p-1} + 6b_p + b_{p+1}), \\ a_1 &= \frac{1}{16} (b_{p+1} - b_{p-1}), \\ a_2 &= \frac{1}{16} (b_{p+1} - 2b_p + b_{p-1}). \end{aligned} \quad (7)$$

Формулы (3) и (7) представляют собой основные формулы вычислительной процедуры для моделирования функции $x(t)$ В-сплайнами. Значения коэффициентов a_1, a_2 многочлена (6) являются, соответственно, оценками первой и второй производной в узлах сеточной функции x_k , $k = 0, 1, \dots, N-1$.

Для корректного вычисления коэффициентов интерполяционной формулы на всей области определения формулы (3) и (7) дополнены выражениями для вычисления значений функции за пределами рассматриваемого интервала, x_{-1} и x_N . В данном случае были использованы простейшие линейные зависимости вида [12]:

$$x_{-1} = 2x_0 - x_1, \quad x_N = 2x_{N-1} - x_{N-2}. \quad (8)$$

Реализованную описанным образом процедуру нахождения сплайн-функции второго порядка отличает простота программной реализации и быстрдействие. Это удовлетворяет требованиям, предъявляемым к обработке длительных реализаций пульсового сигнала (рис. 2). Выделение характерных точек на малоамплитудных сегментах пульсовой волны проводится с помощью комбинированного анализа, сочетающего алгоритмы сплайн-аппроксимации и метод регуляризации А. Н. Тихонова.

Предложенный алгоритм позволил приступить к анализу амплитудно-временных и статистических характеристик пульсового сигнала с последующим вы-



Рис. 2. Погрешность выделения характерных точек пульсовой волны

делением диагностических признаков и созданием каталога пульсов. Кроме того, полученные результаты позволили скорректировать требования к качеству регистрирующего тракта автоматизированного пульсодиагностического комплекса. На основе исследованных методов разработан прикладной пакет программ амплитудно-временного анализа пульсовой волны как составной части АПДК.

1.1.2. Устройство съема пульсограмм

В техническом плане самым сложным и ответственным узлом пульсодиагностического комплекса является устройство съема пульсограмм, включающее в себя датчики пульса и систему крепления их в области лучевой артерии руки человека. После анализа причин, препятствующих корректному съему пульсограмм, предложено новое устройство [13] для их устранения, представленное на рисунке 3. Обосновано преимущество пневматического прижима перед механическим, что позволило повысить воспроизводимость и точность регистрации пульсового сигнала. Испытания показали, что предлагаемое устройство в 2–3 раза уменьшает затраты времени на проведение обследования пациента по пульсу. В [1] описан физический принцип работы этого устройства. На примере одного из трех преобразователей силы пульсового сигнала устройства съема пульсограмм в [4] проведен численный расчет зависи-

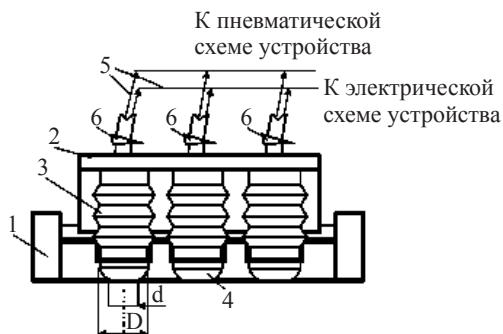


Рис. 3. Пульсометрическое устройство

мости его амплитудно-частотных (АЧХ) и фазовых характеристик от параметров колебательной системы, представленных на рисунке 4. Показано, что при частоте свободных колебаний низкочастотной колебательной системы, равной 300π рад/с (~ 150 Гц), имеют место допустимые фазовые и амплитудно-частотные искажения преобразования сигнала, при которых неравномерность амплитудно-частотной характеристики в диапазоне частот (0,5+30) Гц не превышает 2,5 %, а в районе верхней границы, равной 70 Гц, не превышает 15 %.

Установлено, что дальнейшее увеличение частоты свободных колебаний приводит к уменьшению фазовых и амплитудно-частотных искажений преобразователя силы пульсового сигнала. При указанных характеристиках преобразователя силы пульсового сигнала идентичность между показаниями шести каналов регистрации составляла 95 %, а воспроизводимость результатов ~ 90 %. Вероятность правильной постановки диагноза – 85 %.

Приведенные выше результаты исследований позволили обосновать возможность инструментального способа диагностики заболеваний по пульсу. По техническому заданию, составленному на основе переводов и анализа первоисточников, разработан и изготовлен автоматизированный пульсодиагностический комплекс, удовлетворяющий требованиям диагностики по пульсу в тибетской медицине [18]. Программное обеспече-

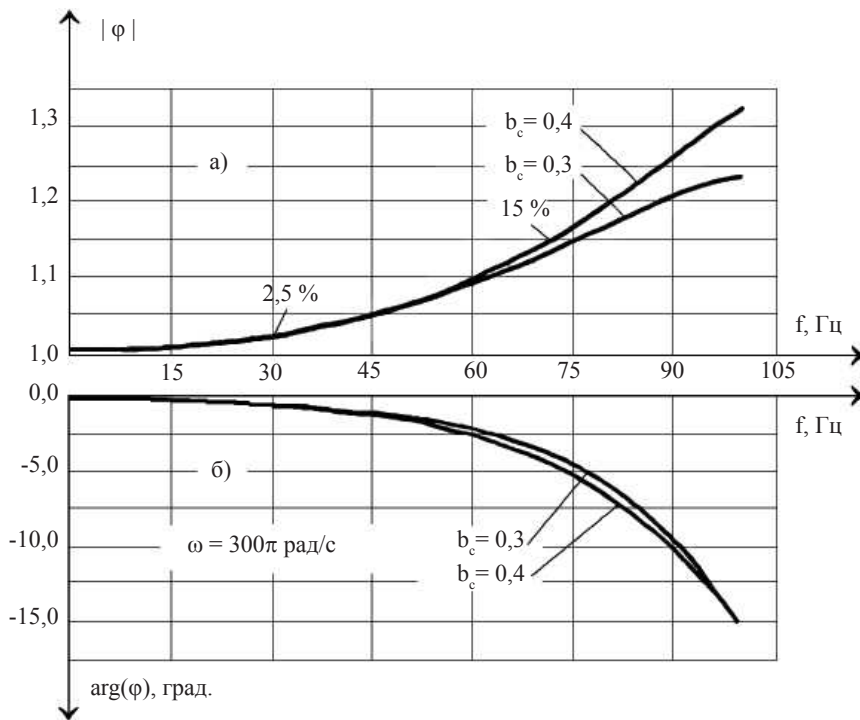


Рис. 4. Амплитудно-частотные и фазовые характеристики датчика пульса: 1) чувствительность – $(12,8 \pm 3)$ мВ/ Па; 2) $\Delta f = (0,3 \div 75)$ Гц; 3) идентичность каналов – 95 %; 4) повторяемость – 90 %; 5) вероятность правильного диагноза – 95 %

ние комплекса включает в себя универсальный пакет программ управления контроллером еврокрейта, специализированную программу ввода данных с модулей еврокрейта, подпрограммы графического представления экспериментальных данных, работающие в реальном масштабе времени, и автоматического выделения характерных точек исследуемых кривых двумя методами: а) с использованием аппроксимирующих свойств сплайн-функций и б) методом регуляризации Тихонова, адаптированного к анализу сфигмограммы лучевой артерии. В пакет включены программы расчета объемных и скоростных показателей насосной функции сердца по длительностям фаз кардиоцикла, а также амплитудно-временных и статистических характеристик пульсовой волны, несущих информацию о функциональном состоянии организма человека. Система поддержки принятия

решения (СППР), используя базу знаний и результаты анализа пульсового сигнала, дает предварительную оценку состояния 12 внутренних органов. С учетом заключения СППР врач ставит окончательный диагноз заболевания. Комплекс не имеет аналогов в мире.

Инструментальный метод диагностики болезней по пульсу [19] может быть использован как автономно, так и дополнительно к поликардиографическому и полисфигмографическому методам исследования состояния человека. Базовый вариант АПДК позволяет синхронно регистрировать десять физиологических сигналов (электрокардиограмму – ЭКГ, фонокардиограмму – ФКГ, скоростную кинетокардиограмму – ККГс, сфигмограмму сонной артерии – СФГса и шесть сфигмограмм лучевой артерии – СФГла (по три СФГла с каждой руки пациента)).

Заключение

В рамках первой части обзора основные результаты работы, полученные в процессе комплексного изучения проблемы объективизации и автоматизации пульсовой диагностики заболеваний в тибетской медицине, кратко можно сформулировать следующим образом.

1. Обоснованы метод диагностики состояния организма по пульсу и методика измерения пульсовой волны в традиционных точках пальпации на лучевой артерии руки человека инструментальными средствами.

2. Разработаны аппаратно-программные средства, которые включают в себя

автоматизированный пульсодиагностический комплекс, удовлетворяющий требованиям диагностики болезней по пульсу в тибетской медицине, и пакет программ для обработки и анализа пульсовой волны. Основу АПДК составляет многозонное устройство съема пульсограмм.

Во второй части обзора, которая выйдет в следующем номере журнала, будут представлены результаты амплитудно-временного и статистического анализа пульсовой волны с помощью автоматизированного пульсодиагностического комплекса и математических алгоритмов, описанных в первой части, а также прикладное значение результатов исследования метода диагностики по пульсу.

Литература

1. Азаргаев Л. Н., Бороноев В. В., Поплаухин В. Н., Сторчун Е. В. Устройство регистрации пульсовой волны // Медицинская техника. – 1998. – № 2. – С. 28–32.
2. Бадмаев П. А. О системе врачебной науки Тибета. Вып. 1. – СПб., 1898. – 234 с.
3. Бороноев В. В. Пульсовая диагностика заболеваний в тибетской медицине: физические и технические аспекты. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2005. – 294 с.
4. Бороноев В. В., Поплаухин В. Н., Сторчун Ю. Е. Амплитудно-частотные и фазовые характеристики преобразователя силы пульсового сигнала для многозонной пульсовой диагностики // Медицинская техника. – 1998. – № 2. – С. 32–35.
5. Бороноев В. В., Шабанова Е. В. Численное дифференцирование сфигмограммы лучевой артерии методом регуляризации А. Н. Тихонова // Измерительная техника. – 1994. – № 11. – С. 60–62.
6. Вогралик В. Г. Учение о пульсе в китайской народной медицине // Клиническая медицина. – 1957. – № 4. – С. 137–145.
7. Дашиев Д. Б. Материалы тибетских источников по пульсовой диагностике // Пульсовая диагностика тибетской медицины. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1988. – С. 33–41.
8. Десова А. А., Короткий В. Ф., Белова И. И., Журавель А. А. Выделение дополнительных информативных признаков в сигнале периферического пульса для оценки функционального состояния человека-оператора // Физиология человека. – 1985. – Т. 11. – № 2. – С. 192–200.
9. Дудин С. А., Бороноев В. В., Цыдытов Ч. Ц. Алгоритм фильтрации сигнала повышенного быстрого действия // Радиотехника. – 1994. – № 7. – С. 57–61.
10. Ибн Сина (Авиценна). Канон врачебной науки. Кн. 1. – Ташкент: Фан, 1954. – 560 с.
11. Инструментальные методы исследования сердечно-сосудистой системы: справочник. – М.: Медицина, 1986. – 416 с.
12. Орлов И. И. Об одном методе численного решения одномерного волнового уравнения // Дифракция и распространение волн: сб. докл. Рос. науч.-техн. конф. – Улан-Удэ, 1996. – С. 31–33.
13. Патент № 2085111 (РФ). Устройство для измерения пульса / Л. Н. Азаргаев, В. В. Бороноев, В. Н. Поплаухин, Е. В. Сторчун. – Опубликовано 27.07.97. Бюл. № 21.

14. Позднеев А. А. Учебник тибетской медицины. – СПб., 1908. – 498 с.
15. Пупышев В. Н. Тибетская медицина: язык, теория, практика. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1991. – 140 с.
16. Ульянов Д. Тибетская медицина. Ч. 1 / пер. с тиб. Д. Ульянова. – СПб., 1903. – 86 с.
17. «Чжуд-ши» – канон тибетской медицины / пер. с тиб. Д. Б. Дашиева. – М.: Восточная литература РАН, 2001. – 766 с.
18. Voronoyev V. V. Pulstasten mit Computer // Das Wissen vom Heilen: Tibetische Medizin. – Bern-Stuttgart-Wein, 1997. – P. 152–155.
19. Voronoyev V. V. Research on Tibetan Pulse Diagnosis // Ayur Vijnana. – 1998. – Vol. 4. – № 1. – P. 17–22.
20. Voronoyev V. V., Poplaukhin V. N. The State of Instrumental Solution of Objectivization and Automatization of Pulse Diagnostics // Tibetan Medicine: the History, Methodology and Prospects of Use. – Ulan-Ude, 1989. – P. 57–66.
21. Voronoyev V. V., Rinchinov O. S. Methods of Spline Approximation in the Problem of Amplitude-Time Analysis of a Pulse Wave // Radiophysics and Quantum Electronics. – 1998. – Vol. 41. – № 8. – P. 706–715.
22. Chun T. Lee, Ling G. Wey. Spectrum Analysis of Human Pulse // IEEE Transmission on Biomedical Engineering. – 1983. – BME-30. – № 6. – P. 348–352.
23. Donden Y. Pulse Diagnostics in Tibetan Medicine // Tibetan Medicine. – 1980. – № 1. – P. 13–30.
24. Dolma L. Talk on Pulse Diagnostics in Tibetan Medicine // Tibetan Medicine – 1982. – № 5. – P. 6–30.
25. Fink E. The Foundation of Tibetan Medicine. – London, 1980. – 318 p.
26. Laub J. H. A New Non-invasive Pulse Wave Recording Instrument for the Acupuncture Clinic // Amer. J. of Acupuncture. – 1983. – Vol. 11. – № 3. – P. 255–259.
27. Meyer F. Gso-ba-rig-pa. Le systeme medical tibetain. – Paris, 1981. – 237 p.
28. Pat. 2262952 (France). Dispositiv destine a determiner et enregistrer les caracteristiques du pouls arteriel radial / J. C. Darras. – Publ. 08.03.1974.
29. Pat. 4066066 (USA). Electronic Pulse Feeling Device for Practice of Diagnosis in Oriental Medicine / H. S. Pack. – Publ. 03.01.1978.
30. Pat. 5381797 (USA). Pulse Diagnostic Device and Method of Measuring a Pulse Wave Using this Device / S. C. Pak, V. V. Coltcov, A. Y. Kryssov, I. I. Emtlianov, E. E. Kotekin. – Publ. 17.01.1995.
31. Poopyshev V. N. A Step to Tibetan Medicine // Tibetan Medicine: the History, Methodology and Prospects of Use. – Ulan-Ude, 1989. – P. 45–57.
32. Schnorrenberger C. C. Zehrbuch der chinesischen Medizin fur westliche Arzte. – Stuttgart: Hippokrates Verlag, 1979. – 636 s.
33. Tsydyrov T. S., Boronoyev V. V., Poopyshev V. N., Trubacheyev E. A. Problems of Objectivization of Pulse Diagnostics of Oriental Medicine // Tibetan Medicine: the History, Methodology and Prospects of Use. – Ulan-Ude, 1989. – P. 18–25.
34. Zhambaldagbayev N. Ts. On the Problem of Studying Original Sources on Pulse Diagnostics of Chinese Medicine // Tibetan Medicine: the History, Methodology and Prospects of Use. – Ulan-Ude, 1989. – P. 73–77.