

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра динамического моделирования и биомедицинской инженерии
наименование кафедры

**Исследование фазовой синхронизации по многочасовым записям
сигналов сердечно-сосудистой системы**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 461 группы

направления 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии»

код и наименование направления

факультета nano- и биомедицинских технологий

наименование факультета

Сказкиной Виктории Викторовны

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н

должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

А.С. Караваев

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой:

д.ф.-м.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

Е.П. Селезнев

инициалы, фамилия

Саратов 2016 г.

Введение. Сердечно-сосудистая система (ССС) является одной из наиболее важных физиологических систем в организме человека. Согласно современным представлениям, в функционировании СССР принимают участие различные подсистемы. К ним можно отнести дыхание, сердечный ритм, кровенаполнение периферических сосудистых территорий, вегетативную систему и т.д. Как было показано в ряде предшествующих работ, процессы регуляции подсистем не только взаимодействуют друг с другом, но и могут быть синхронизованы.

Вегетативная система регуляции СССР характеризуется наличием в ней основного автоколебательного процесса в низкочастотной области спектра (около 0,1 Гц). Данные колебания в вариабельности сердечного ритма относят к свойствам центрального звена вегетативной системы. Детальное изучение регуляторных процессов позволит создать новые методы диагностики состояния СССР, а также усилить эффективность уже существующих.

Одним из перспективных методов исследования состояния СССР является определение степени синхронизованности регуляторных процессов, связанных с изменением сердечного ритма и тонуса сосудистой стенки артерии. Как было показано в ряде работ, величина синхронизации регуляторных процессов имеет практическое применение в качестве диагностики состояния сердца и сосудов. В частности, в ходе многих экспериментов, было определено, что наиболее высокая степень синхронизации подсистем вегетативной регуляции СССР характерна для людей с хорошей физической формой, низкий показатель синхронизованности наблюдался у людей, перенесших инфаркт миокарда.

Данный метод отличается простотой и высокой эффективностью в клинической практике. Изучение свойств суммарного процента фазовой синхронизации сигналов СССР с частотой 0,1 Гц (S) на сегодняшний момент уже проводилось. Этому можно найти документальное подтверждение в виде множества опубликованных работ на данную тему. Однако большинство

исследований при анализе данных использовали короткие записи временных рядов ЭКГ и ФПГ (около 10 минут). В то время как особый интерес вызывает динамика колебаний суммарного процента фазовой синхронизации сигналов, а также изменение их спектральных составляющих в течение длительного времени. Однако это несет в себе множество трудностей: во-первых, исследования длинных записей требуют проведения специальных экспериментов, в ходе которых необходимо осуществлять многочасовую регистрацию экспериментальных временных рядов. Во-вторых, анализ сигналов биологической природы, которым свойственна зашумленность, нестабильность и нелинейность, требует использование специальных подходов нелинейной динамики и статистики. Кроме этого, необходимой является разработка отдельных методов анализа длинных записей. В данной работе рассматриваемые ранее величины были исследованы с помощью длинных двухчасовых записей. Подобные исследования могут дать фундаментальные представления о функциональной работе систем регуляции сердца и сосудов.

Таким образом, целью настоящей работы является исследование суммарного процента фазовой синхронизации сигналов регуляции сердца и сосудов с частотой около 0,1 Гц. К основным задачам можно отнести регистрацию двухчасовых записей, подготовку данных к анализу, расчет суммарного процента фазовой синхронизации и оценку результата.

Дипломная работа выполнена на 34 листах и содержит 4 главы. В первой главе описаны особенности исследуемой ССС. Вторая глава содержит описание метода расчета суммарного процента фазовой синхронизации сигналов регуляции сердца и сосудов, а также его прикладное значение в медицине. Третья глава включает в себя результаты спектрального анализа данных. В заключительной части описаны итоги корреляционного анализа рассчитанных величин. В работе представлено 8 рисунков. Список литературы включает в себя 41 ссылку на научные материалы.

Основная часть. Функциональная система регуляции кровообращения представляет собой многоконтурную, иерархически организованную систему, в которой доминирующая роль отдельных звеньев определяется текущими потребностями организма. Наиболее простая двухконтурная модель регуляции сердечного ритма основывается на разделении системы регуляции на два взаимосвязанных уровня: центрального и автономного с прямой и обратной связью. При этом воздействие автономного уровня идентифицируется с дыхательной, а центрального с недыхательной аритмией.

Рабочими структурами автономного контура регуляции являются: синусовый узел (СУ), блуждающие нервы и их ядра в продолговатом мозгу (контур парасимпатической регуляции). При этом дыхательная система рассматривается как элемент обратной связи в автономном контуре регуляции сердечного ритма (СР).

Деятельность центрального контура регуляции, который идентифицируется с симпатоадреналовыми влияниями на ритм сердца, связана с недыхательной синусовой аритмией (СА) и характеризуется различными медленноволновыми составляющими сердечного ритма. Прямая связь между центральным и автономным контурами осуществляется через нервные (в основном симпатические) и гуморальные связи. Обратная связь обеспечивается афферентной импульсацией с барорецепторов сердца и сосудов, хеморецепторов и обширных рецепторных зон различных органов и тканей.

Центральный контур регуляции СР – это сложнейшая многоуровневая система нейрогуморальной регуляции физиологических функций, которая включает в себя многочисленные звенья от подкорковых центров продолговатого мозга до гипоталамо-гипофизарного уровня вегетативной регуляции и коры головного мозга. Ее структуру можно представить состоящей из трех уровней. Этим уровням соответствуют не столько

анатомо-морфологические структуры мозга, сколько определенные функциональные системы или уровни регуляции:

1-й уровень обеспечивает организацию взаимодействия организма с внешней средой (адаптация организма к внешним воздействиям). К нему относится центральная нервная система, включая корковые механизмы регуляции, координирующая функциональную деятельность всех систем организма в соответствии с воздействием факторов внешней среды.

2-й уровень осуществляет равновесие различных систем организма между собой и обеспечивает межсистемный гомеостаз. Основную роль в этом уровне играют высшие вегетативные центры (в том числе гипоталамо-гипофизарная система), обеспечивающие гормонально-вегетативный гомеостаз.

3-й уровень обеспечивает внутрисистемный гомеостаз в различных системах организма, в частности в кардиореспираторной системе (систему кровообращения и систему дыхания можно рассматривать как единую функциональную систему). Здесь ведущую роль играют подкорковые нервные центры, в частности вазомоторный центр как часть подкоркового сердечно-сосудистого центра, оказывающего стимулирующее или угнетающее действие на сердце через волокна симпатических нервов.

Вариабельность сердечного ритма отражает сложную картину разнообразных управляющих влияний на систему кровообращения с интерференцией периодических компонентов разной частоты и амплитуды: с нелинейным характером взаимодействия разных уровней управления.

При использовании записей СР с длительностью менее 5 минут мы искусственно ограничиваем число изучаемых регуляторных механизмов, сужаем диапазон изучаемых управляющих воздействий. Чем длиннее ряд анализируемых сигналов, тем больше уровней регуляторного механизма можно исследовать. Изучение различных уровней регуляции ССС позволит получить фундаментальные знания о функционировании сердца и сосудов.

В данной работе одним из основных методов изучения вегетативной регуляции ССС является расчет фазовой синхронизации процесса регуляции сердечного ритма и тонуса сосудистой стенки артерии.

Анализ синхронизации между колебательными процессами с собственной частотой около 0,1 Гц осуществлялся с помощью исследования разности фаз этих процессов. Участки синхронизации между ритмами регуляции были диагностированы как участки, на которых относительная фаза колеблется около некоторого постоянного значения. Суммарная длительность всех участков синхронизации, выраженная в процентах от длительности всей записи, названа суммарным процентом фазовой синхронизации (S).

В ходе экспериментов была проведена одновременная запись электрокардиограммы (ЭКГ) и фотоплетизмограммы (ФПГ) сосудов для 12 добровольцев в возрасте около 20 лет. Испытуемые не имели каких-либо патологий сердечно-сосудистой системы, а также прочих острых хронических заболеваний.

Регистрация ЭКГ и ФПГ проводилась при помощи многоканального электроэнцефалографа-анализатора ЭЭГА-21/26 «Энцефалан-131-03» модель 10 (НПКФ «Медиком-МДТ», Россия) с комплектом стандартных датчиков. Частота дискретизации составляла 250 Гц, разрядность – 14 бит, полоса пропускания по всем каналам 0.05-100 Гц. Запись ФПГ, характеризующая колебания кровенаполнения дистального сосудистого русла, проводилось при помощи пульсоксиметрического датчика (в отраженном свете). Запись ЭКГ осуществлялась в первом стандартном отведении по Эйнтховену. Каналы ФПГ регистрировали сигнал с трех участков тела испытуемого: дистальная фаланга безымянного пальца правой руки, дистальная фаланга второго пальца левой ноги и мочка правого уха. Эксперименты проводили в первой половине дня, что позволило исключить влияние суточных колебаний вегетативной регуляции ССС. Исследования у девушек проводили в межменструальный период, что также позволило исключить гормональные

изменения, влияющие на кардиоинтервалограмму (КИГ). Во время эксперимента испытуемый находился в положении сидя и дышал произвольно. Общая длина записи составляла 120 минут (2 часа). Таким образом, было получено 12 записей.

Перед началом расчета S и спектральных составляющих сигнала из ЭКГ была выделена последовательность кардиоинтервалов. Это осуществлялось с помощью специальной программы, разработанной сотрудниками кафедры ДМиБМТ Саратовского Государственного Университета. Расчет данной величины осуществлялся в скользящем окне длиной 300 секунд со сдвигом в 10 секунд с помощью специальной программы, разработанной сотрудниками кафедры ДМиБМИ Саратовского Государственного Университета.

Проанализировав полученные результаты расчета S для всех испытуемых, можно сделать вывод, что значение индекса синхронизации изменяется с течением времени. При этом период этих колебаний составляет около 1000-1500 секунд, что может указывать на влияние гуморальной регуляции на степень синхронизации ритмов вегетативной регуляции.

Спектральные методы анализа variability сердечного ритма в настоящее время получили широкое распространение. Анализ спектральной плотности мощности колебаний дает информацию о распределении мощности в зависимости от частоты колебаний. Применение спектрального анализа позволяет количественно оценить различные частотные составляющие колебаний ритма сердца и сосудов, а также наглядно графически представить соотношения различных компонентов сигналов регуляции ССС, отражающих активность определенных звеньев регуляторного механизма.

Спектральный анализ КИГ и ФПГ позволяет определить различные временные масштабы variability сердечного ритма и тонуса сосудистых стенок артерий. В общем случае в Фарье-спектрах этих сигналов можно различить характерные пики на частоте 0,3 Гц (парасимпатическая

регуляция), 0,1 Гц (симпатическая регуляция) и низкой частоте $<0,05$ Гц (гуморальная регуляция).

В данной работе в качестве дополнительного исследования ССС были рассчитаны низкочастотные составляющие (LF), высокочастотные (HF), их отношение (LF/HF) и общая мощность сигнала (TP). Значения данных величин были определены с помощью программы «Варистат» в скользящем окне длиной 300 секунд со сдвигом в 10 секунд.

Анализируя полученные результаты, можно заметить колебания и среди спектральных составляющих сигнала. Можно отметить, что колебания высокочастотной составляющей HF и низкочастотной LF антикоррелированы. Данное наблюдение иллюстрирует, т.н. реципрокные взаимоотношения отделов вегетативной нервной системы, которые подробнее описаны в главе 1.

Для определения периодичности сигнала был использован корреляционный анализ, который занимает в цифровой обработке сигналов значительное место, позволяя решать целый ряд задач. В первую очередь это сравнение двух сигналов - мера “похожести”. Автокорреляция является полезной количественной характеристикой статистических свойств сигнала. Автокорреляционная функция (зависимость коэффициента автокорреляции от сдвига) может оказать помощь при оценке степени нерегулярности исследуемого сигнала, в особенности, сигнала биологической природы, т.к. для него характерна зашумленность.

Расчет автокорреляционной функции сводится к определению коэффициента корреляции исходного сигнала с сигналом, сдвинутым во времени.

Для исследования свойств изучаемых систем в скользящем окне оценивались АКФ для рассчитанных по данным спектральных индексов. Расчет производился в скользящем окне длиной 300 секунд со сдвигом в 10 секунд.

Изучение автокорреляционных функций рассматриваемых нами величин позволяет выявить колебания в значениях суммарного процента фазовой синхронизации сигналов регуляции сердца и сосудов, а также в значениях их спектральных составляющих, характер которых близок к периодическому. При этом анализ построенных зависимостей позволяет уверенно выделить составляющие с “большим” характерным периодом свыше 900 секунд и “малым” характерным периодом 300-900 секунд в значениях S .

Таким образом, был сделан вывод о том, что в значениях суммарного процента фазовой синхронизации наблюдаются колебательные составляющие с двумя характерными периодами.

Заключение. В ходе работы были проведены специальные эксперименты двухчасовой регистрации экспериментальных временных рядов здоровых испытуемых. Всего было получено 12 записей.

Было проведено исследование колебаний суммарного процента фазовой синхронизации сигналов регуляции сердца и сосудов с частотой около 0,1 Гц. В динамике изменения S были обнаружены колебания с двумя преобладающими периодами: малый (300-900 секунд) и большой (900-2500 секунд).

Исследование динамики колебаний было осуществлено и для спектральных составляющих сигналов фотоплетизмограммы, снятой с трех участков тела: рука, нога, уха, и кардиоинтервалограммы. Для рассмотренных нами составляющих также характерна периодичность.

Таким образом, были впервые обнаружены медленные колебания в динамике суммарного процента фазовой синхронизации сигналов вегетативной регуляции сердца и сосудов. Изучение механизмов, вызывающих появления таких осцилляций, является предметом дальнейшего исследования. Полученные результаты могут быть причиной изменения дизайна исследований S в клинической практике. В частности, наличие медленных колебаний в 1000 и более секунд предполагает увеличение

длины записи электрокардиограммы и фотоплетизмограммы сосудов для анализа.

По результатам работы были опубликованы 3 статьи [1-3] и 3 тезисов [4-6] в сборники Всероссийских конференций.

Список литературы

1. Kiselev A.R., Mironov S.A., Karavaev A.S., Kulminskiy D.D., Skazkina V.V., Borovkova E.I., Shvartz V.A., Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D. A comprehensive assessment of cardiovascular autonomic control using photoplethysmograms recorded from earlobe and fingers // *Physiological Measurement*. 2016. V. 37. P. 580-595.
2. Сказкина В.В., Боровкова Е.И., Бутенко А.А. Анализ синхронизованности 0.1 Гц ритмов вегетативной регуляции подсистем по многочасовым записям // *Журнал «Бюллетень медицинских Интернет-конференций»*. 2015. Т.5. № 11. С.1421-1425.
3. Боровкова Е.И., Сказкина В.В., Кульминский Д.Д., Чуб Р.О., Бутенко А.А., Селезнев Е.П. Статистический анализ разностей фаз 0.1 Гц систем вегетативной регуляции по двухчасовой записи // *Журнал «Бюллетень медицинских Интернет-конференций»*. 2015. Т.5. № 11. С.1433-1435.
4. В.В. Сказкина, А.Р. Киселев, С.А. Миронов, А.С. Караваев Зависимость процента фазовой синхронизации от положения тела человека // *«Современные проблемы биомедицинской инженерии»: сборник материалов Всероссийской молодежной научной конференции*. 2015. С. 24-28.
5. Сказкина В.В., Киселев А.Р., Миронов С.А., Караваев А.С. Зависимость суммарного процента фазовой синхронизации от положения тела человека // *Современные проблемы биомедицинской инженерии: сборник материалов Всероссийской молодежной научной конференции*. 2015. С. 24-27.
6. Боровкова Е.И., Ишбулатов Ю.М., Сказкина В.В., Караваев А.С. Количественная мера диагностики фазовой синхронизованности 0.1 Гц

ритмов регуляции сердечно-сосудистой системы по многочасовым записям // Тезисы X Всероссийская научная конференция «Нанoeлектроника, Нанofотоника и Нелинейная Физика». 2015. С. 22-23.