

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра динамического моделирования и биомедицинской инженерии

Анализ спектральных свойств сигнала кардиоинтервалограммы при
различных патологиях

наименование темы выпускной квалификационной работы

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 4081 группы
направления 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии»
профиль подготовки «Методы и устройства обработки биосигналов»
институт физики

Зюзина Дарья Александровна

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель:
Доцент, к.ф.-м.н.

«Отлично»

Е.В. Навроцкая

Е.В. Навроцкая

подпись, дата

20.06.2025

Зав. кафедрой динамического
моделирования и
биомедицинской инженерии,
д.ф.-м.н., профессор

А.С. Караваев

[Подпись]
подпись, дата

20.06.2025

Саратов 2025

Введение. Анализ сигналов сердечно-сосудистой системы является важной задачей в области биомедицинской инженерии и клинической медицины [1-3]. Сигналы, такие как электрокардиограмма (ЭКГ), содержат ценную информацию о функционировании сердца и состоянии сердечно-сосудистой системы [4].

В современных исследованиях все большее значение приобретает использование методов цифровой обработки сигналов для диагностики и мониторинга состояния здоровья пациента [1-4]. Одним из широко используемых биомедицинских сигналов является кардиоинтервалограмма [5], которая отражает изменения временных интервалов между последовательными сердечными сокращениями. Анализ спектральных свойств этого сигнала позволяет выявлять характерные особенности функционирования вегетативной нервной системы, а также диагностировать различные патологические состояния сердца и сосудов [5].

Исследование спектральных характеристик кардиоинтервалограммы особенно актуально в связи с ростом распространенности сердечно-сосудистых заболеваний, и как следствие потребности в неинвазивных методах ранней диагностики. Также следует отметить и другие причины, подтверждающие актуальность данной работы, а именно: изучение вегетативной регуляции сердца, необходимость исследований в области персонализированной медицины, необходимость создания методов мониторинга состояния пациентов со сниженным уровнем сознания.

Цель данной работы заключается в применении методов спектрального анализа к сигналу сердечно-сосудистой системы, такому как КИГ, для оценки характерных частотных свойств variability сердечного ритма (ВСР) здоровых добровольцев, а также особенных состояний нервной системы.

В рамках дипломной работы поставлены следующие задачи: спектральный анализ кардиоинтервалограмм (КИГ) для здоровых добровольцев, пациентов со сниженным уровнем сознания (кома), для пациентов во время анестезии при спинальной блокаде ВНС.

Объектом исследования является анализ частотных свойств variability сердечного ритма здоровых добровольцев, а также при особенных состояний нервной системы. Материалы исследования включают в себя записи ЭКГ здоровых добровольцев в состоянии лежа и пациентов при особенных состояний нервной системы (кома на фоне острого нарушения мозгового кровообращения и спинальная анестезия). В ходе работы применялись методы спектрального анализа, построение КИГ из записей ЭКГ, а так же ручной очистки сигнала КИГ от артефактов.

Работа содержит введение, четыре главы и заключение. В первых трех главах проведен теоретический обзор: механизмов регуляции сердечного ритма, методов оценки спектра мощности сигнала КИГ, а также описание физиологической интерпретации частотных компонент спектра сигнала КИГ человека. Последняя, четвёртая, глава содержит описание практической части, которая заключается в анализе экспериментальных сигналов разных групп пациентов.

Основное содержание работы. Спектральный анализ сердечно-сосудистой системы — это совокупность методов, которые позволяют исследовать сигналы, связанные с работой сердца и сосудов. Спектральный анализ сердечного ритма основан на разложении сигнала на составляющие частоты и изучении их относительного вклада в сигнал. Частотный спектр сигнала отображает зависимость амплитуды каждой гармоники от ее частоты.

Электрокардиограмма (ЭКГ) представляет собой сигнал, отражающий электрическую активность сердца, и содержит информацию о временных интервалах между последовательными сердечными сокращениями [4-5]. Variability сердечного ритма (ВСР) представляет собой изменения интервалов между систолами, которая отражает способность сердечно-сосудистой системы адаптироваться к меняющимся условиям. ВСР образуются из-за влияния различных факторов как внешнего формата, так и внутреннего. Данный показатель определяется при помощи обследования

продолжительности периодов сердечных сокращений за конкретное время. Как правило, для этого оценивают расстояние между зубцами R [5]. Последовательность интервалов между R зубцами записанная в виде временного ряда представляет собой кардиоинтервалограмму (КИГ). Кардиоинтервалограмма является графическим представлением временных промежутков и служит основой для дальнейшего анализа. Спектральный анализ КИГ является одним из важных методов изучения variability сердечного ритма и оценки вегетативной регуляции сердечной деятельности [6].

Одним из основных этапов процесса спектрального анализа КИГ является преобразование Фурье — это математическая операция, позволяющая перейти от представления сигнала или функции во временной области к представлению в частотной области и обратно. Оно раскладывает сигнал на составляющие синусоидальные колебания различных частот, получая спектр мощности (функция, показывающая распределение мощности сигнала по частотам) [7-8]. Это помогает идентифицировать скрытые ритмы, нарушения проводимости и другие патологические изменения, которые могут быть незаметны при визуальном анализе.

Преобразование Фурье представляется выражением (1):

$$S(f) = F[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt. \quad (1)$$

Графическое представление по формуле (2):

$$|S(f)| = \sqrt{(\operatorname{Re}S(f))^2 + (\operatorname{Im}S(f))^2} \quad (2)$$

после преобразования Фурье называют амплитудным спектром сигнала $x(t)$, наиболее часто на практике используют спектр мощности $|S(f)|^2$ [7].

В спектральном анализе variability сердечного ритма по сигналу КИГ выделяют три основных частотных диапазона: высокие частоты (HF),

низкие частоты (LF) и сверхнизкочастотные (VLF) [8]:

1. HF (высокие частоты, 0.15-0.4 Гц) - отражают влияние парасимпатического отдела вегетативной нервной системы на ритм сердца, связаны с дыхательной аритмией. Мощность в диапазоне HF берется путем интегрирования спектральной плотности мощности в соответствующем частотном диапазоне. Включает в себя все механизмы, направленные на восстановление энергетических ресурсов организма [8];

2. LF (низкие частоты, 0.04-0.15 Гц) - считается, что отражают в основном активность симпатического отдела ВНС, а также частично парасимпатического. Мощность LF также определяется интегрированием спектра в заданном диапазоне частот [8];

3. VLF — сверхнизкочастотный сосудисто-двигательный или васкулярный диапазон до 0,05 Гц (период колебаний от 25 с до 5 мин) (медленные волны второго порядка Майера) отражает действие центральных эрготропных и гуморально-метаболических механизмов регуляции; реализуется через изменение в крови гормонов (ретин, ангиотензин, альдостерон и др.) [8].

Эти частотные диапазоны и соответствующие мощности выделяются опытным путем исходя из физиологических особенностей регуляции ритма сердца вегетативной нервной системой и дыхательной аритмией. Их анализ позволяет оценивать вегетативный баланс при различных состояниях организма.

Далее были получены записи ЭКГ здоровых добровольцев в состоянии лежа и пациентов при различных патологиях и особенных состояниях нервной системы (кома на фоне острого нарушения мозгового кровообращения и спинальная анестезия). Для всех добровольцев регистрировалось ЭКГ во втором стандартном отведении с частотой дискретизации 250 Гц с помощью электроэнцефалографа-регистратора «Энцефалан-ЭЭГР-19/26». Длина записей составляла от 20-ти до 90 минут. Из полученных записей электрокардиограммы, программным путем были построены RR-интервалы, предварительно очищенные от артефактов.

В начале был построен амплитудный спектр $|S(f)|$ по всей длине временного ряда для здорового добровольца. На рисунке 1 можно увидеть пики в HF и LF диапазонах, а также компоненты в VLF диапазоне. Хорошо выраженные диапазоны LF и HF с отчетливыми пиками и высокой амплитудой говорят о нормальном функционировании сердечно-сосудистой системы и сбалансированной активности вегетативной нервной системы.

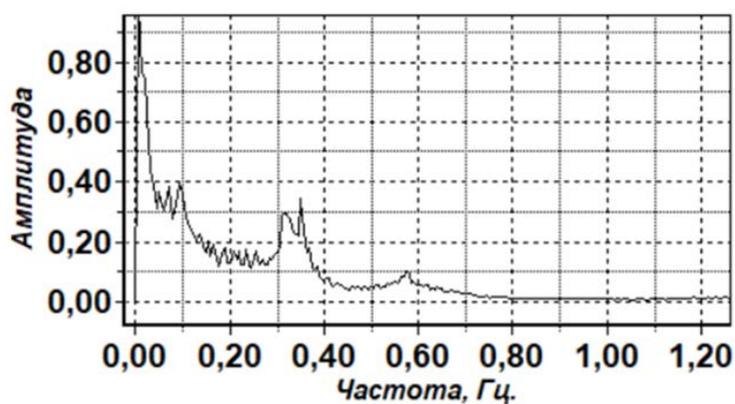


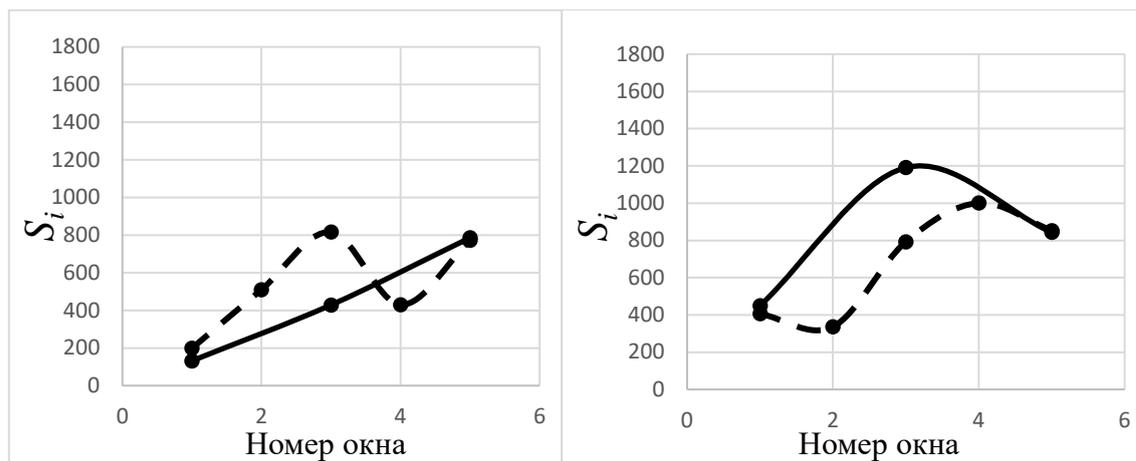
Рисунок 1- Периодограмма для КИГ здорового добровольца

Для всех здоровых добровольцев были получены оценки интегральной мощности S_i (сумма значений $|S(f)|$ для всех частот, попадающих в выбранный диапазон) в основных частотных диапазонах - VLF, HF, LF. Для этого были построены периодограммы в окнах по 5 и 10 минут и для каждой периодограммы оценивалась интегральная мощность. На рисунке 2 представлены зависимости значений интегральной мощности от номера окна для здорового добровольца в каждом из частотных диапазонов.

На представленных графиках можно наблюдать колебания интегральных мощностей в 3х частотных диапазонах в течение 30 минут записи. Которые могут предоставить информацию о динамике вариабельности сердечного ритма и функционировании вегетативной нервной системы (ВНС).

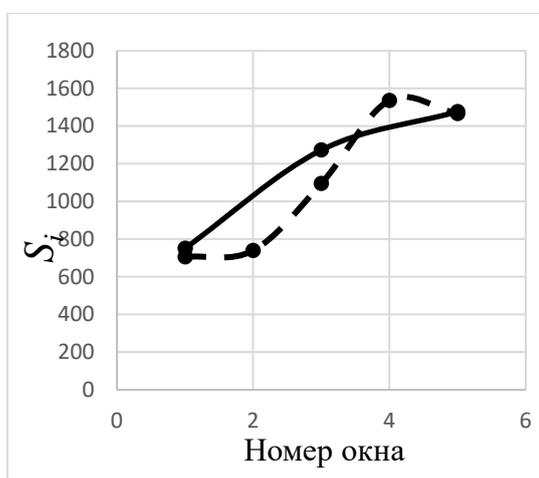
На графиках, основанных на 5-минутных участках, наблюдаются более четкие и выраженные колебания интегральной мощности, по сравнению с

графиками, основанными на 10-минутных участках. Это связано с тем, что 5-минутные интервалы обеспечивают высокую разрешающую способность, что позволяет более точно фиксировать и анализировать краткосрочные изменения в активности вегетативной нервной системы. Короткие временные рамки помогают выявить даже незначительные колебания, которые могут быть сглажены при анализе более длинных интервалов.



а)

б)



в)

Рисунок 2 - Зависимость интегральной мощности в диапазоне VLF (а), LF (б) и HF (в) для здорового добровольца. Пунктирная линия отображает значения интегральной мощности в последовательных 5-минутных окнах КИГ, сплошная - значения интегральной мощности в последовательных 10-ти минутных окнах КИГ

КИГ

По аналогии, со здоровым пациентом, была построена периодограмма по всей длине временного ряда пациента в коме согласно рисунку 3, на котором можно увидеть низкие значения амплитуды в диапазонах как низкой (LF), так и высокой частоты (HF). Это свидетельствует о сниженной вариабельности сердечного ритма и угнетении деятельности вегетативной нервной системы.

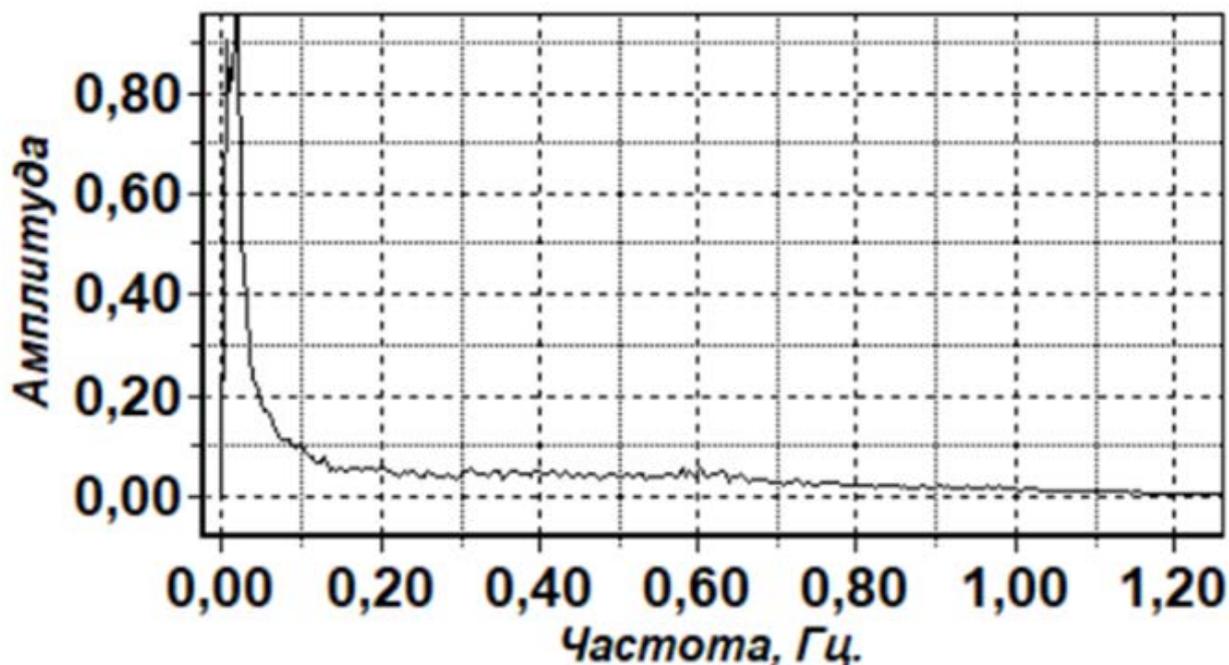
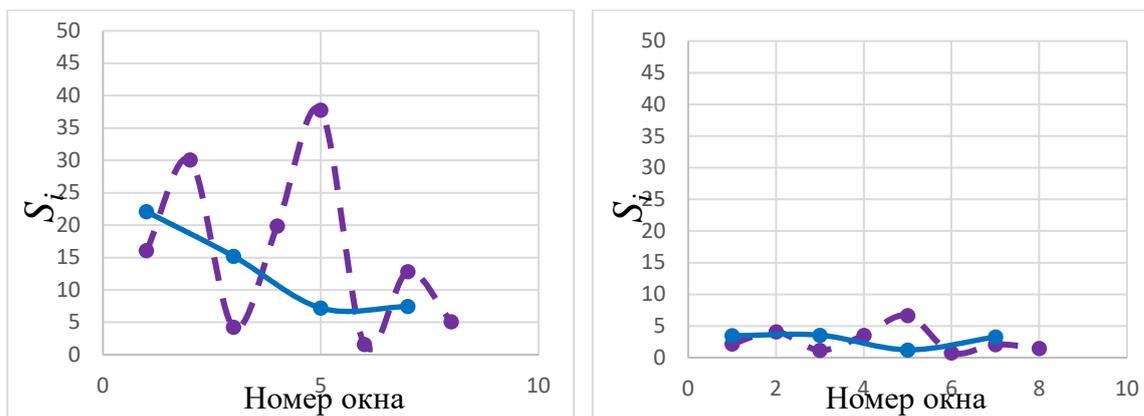


Рисунок 3 - Периодограмма КИГ пациента в коме

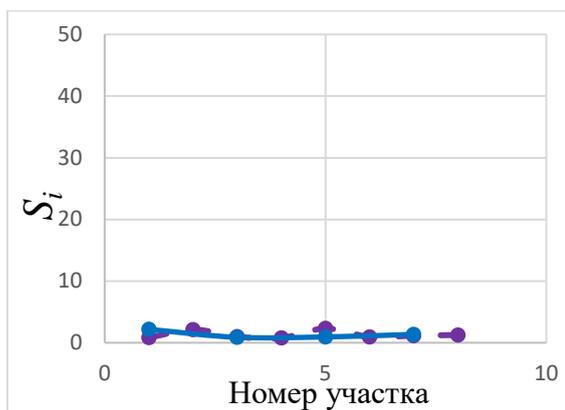
Расчет интегральной мощности в основных частотных диапазонах (VLF, HF, LF) для данного пациента приведен на рисунке 4.

На представленных графиках можно наблюдать колебания интегральных мощностей в 3х частотных диапазонах в течение 80 минут записи. Можно заметить характерные колебания наблюдаются лишь в VLF диапазоне, в то время как в LF и HF диапазонах они минимальны, что говорит о подавленности симпатической и парасимпатической регуляции, что присуще пациентам в коме.



а)

б)



в)

Рисунок 4 - Зависимость интегральной мощности в диапазоне VLF (а), LF (б) и HF (в) для пациента в коме. Пунктирная линия отображает значения интегральной мощности в последовательных 5-минутных окнах КИГ, сплошная - в последовательных 10-ти минутных окнах КИГ

Так же был построен амплитудный спектр по всей длине временного ряда пациента с анестезией, представленный на рисунке 5. На котором можно увидеть приблизительно схожие по амплитуде компоненты в HF и LF диапазонах, а также отчетливый пик в VLF диапазоне.

По аналогии, с предыдущими пациентами, были получены оценки интегральной мощности в основных частотных диапазонах - VLF, HF, LF и для пациента во время анестезии при спинальной блокаде ВНС. На рисунке 6 представлены зависимости значений интегральной мощности от номера окна для пациента с анестезией в каждом из частотных диапазонов.

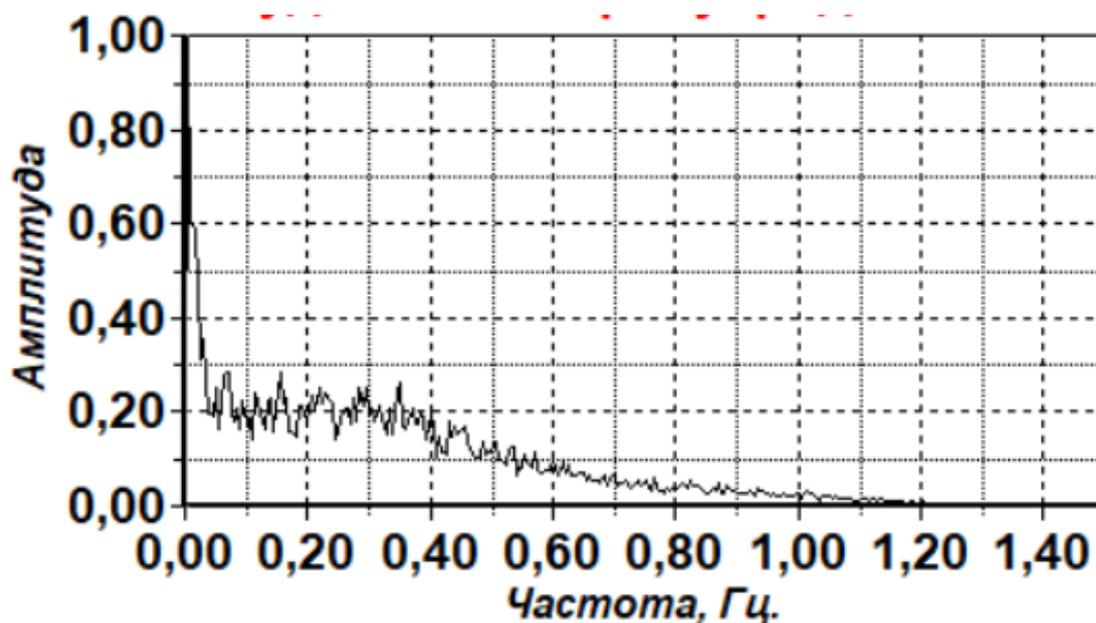
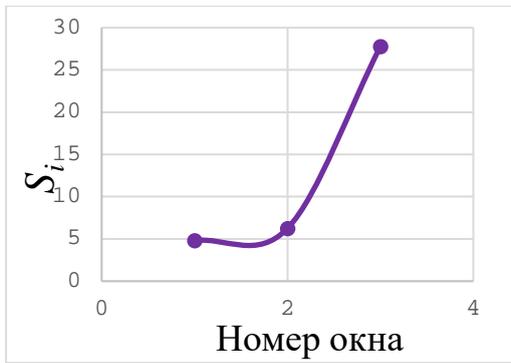


Рисунок 5 - Периодограмма КИГ пациента с анестезией

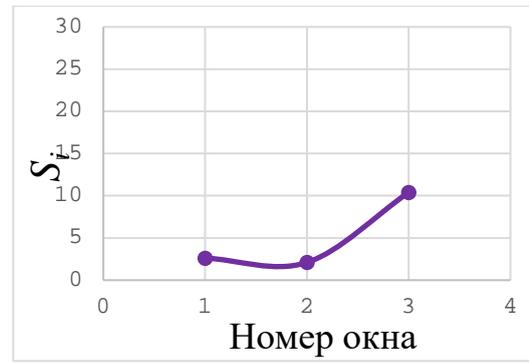
На представленных графиках можно наблюдать возрастание интегральных мощностей в частотных диапазонах VLF и LF, и наоборот, снижение интегральной мощности в диапазоне HF в течение времени.

Так же для всех испытуемых были построены спектрограммы, отражающие изменение амплитуды частотных составляющих от времени. Спектрограмма строилась в неперекрывающихся окнах шириной 3 минуты рисунок 7. Цветом показаны нормированные значения амплитуды (нормировались на максимальное значение амплитуды в диапазоне частот 0-0.8 Гц). Для здорового добровольца рисунок 7(а), на построенных спектрограммах можно наблюдать варьирование выраженности частотных компонент между диапазонами LF и HF, что может отражать гомеостатические механизмы и адаптацию к различным условиям.

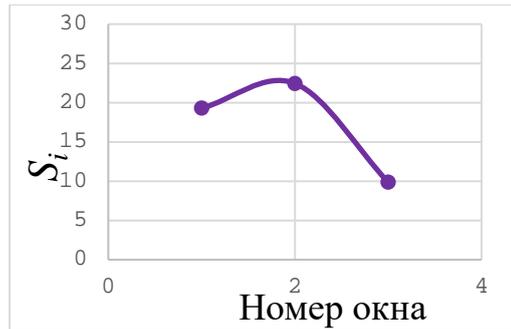
По спектрограммам для пациента в коме рисунок 7.б), можно заметить, что самые выраженные ритмы КИГ приходятся на VLF диапазон, подтверждая, что именно на уровне очень низких частот происходит основная регуляция кровообращения.



а)



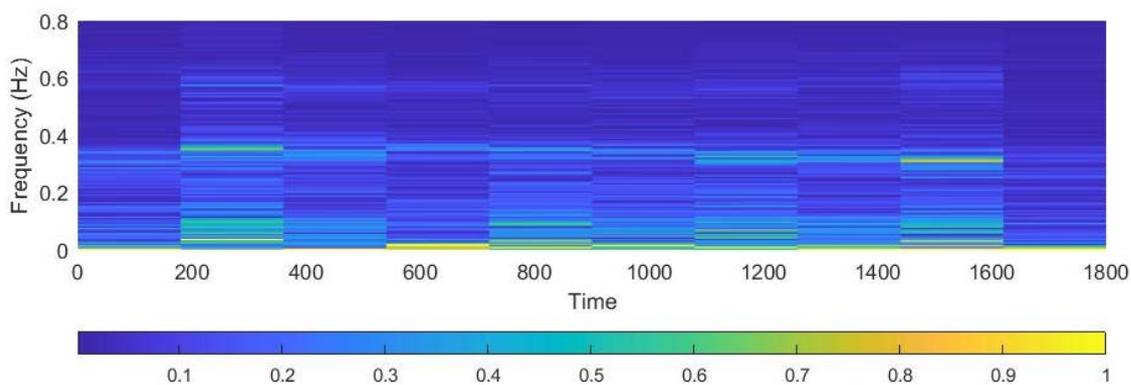
б)



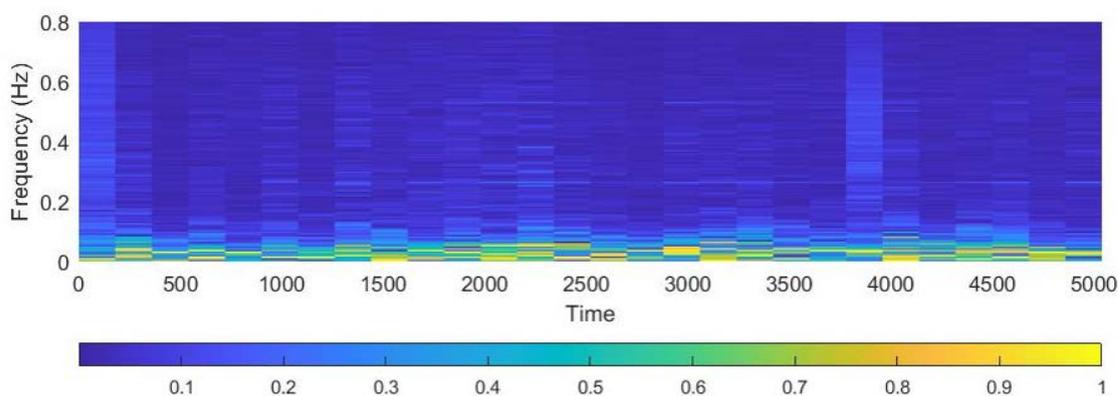
в)

Рисунок 6 - Зависимость интегральной мощности в диапазоне VLF (а), LF (б) и HF (в) для пациента с анестезией

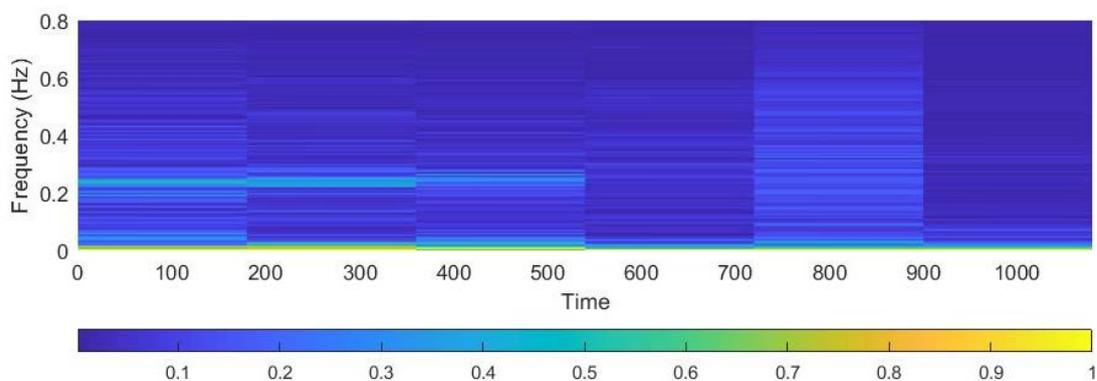
Для пациента с анестезией рисунок 7.в), в дополнение к графикам интегральной мощности наблюдается снижение выраженности частот в HF диапазоне после 9-ой минуты записи, что может быть связано с началом действия анестетика.



а)



б)



в)

Рисунок 7- Спектрограммы (а) для первого здорового добровольца, (б) для пациента в коме, (в) для пациента с анестезией

Заключение. В ходе работы, был проведен анализ частотных свойств variability сердечного ритма с помощью спектрального анализа для здоровых добровольцев и пациентов в особенных состояниях нервной системы: во время комы и при спинальной анестезии. Получены оценки амплитудных

спектров сигналов кардиоинтервалограммы, оценки интегральной мощности, рассчитаны спектрограммы сигналов КИГ для пациентов рассматриваемой группы. Анализ спектральных характеристик в окнах шириной 5 минут показал, что у здоровых пациентов наблюдаются колебания интегральной мощности в VLF, LF и HF-диапазонах с периодом около от 10 до 25 минут. Для пациентов в коме показано наличие колебаний интегральной мощности преимущественно в диапазоне VLF, для некоторых пациентов также в частотном диапазоне LF. Для пациентов с анестезией показано наличие снижения активности в HF диапазоне в течение времени наблюдения. Таким образом, показано отличие спектральных свойств у здоровых испытуемых и пациентов в коме и с анестезией. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшей разработки методов дополнительной диагностики и мониторинга состояния пациентов в коме и во время действия анестезии с точки зрения деятельности вегетативной регуляции кровообращения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Karavaev A.S., Borovik A.S., Borovkova E.I., Orlova E.A., Simonyan M.A., Ponomarenko V.I., Skazkina V.V., Gridnev V.I., Bezruchko B.P., Prokhorov M.D., Kiselev A.R. Low-frequency component of photoplethysmogram reflects the autonomic control of blood pressure // Biophysical Journal, 2021, V.120, N.13, P.2657–2664.

2. Kiselev A.R., Borovkova E.I., Shvartz V.A., Skazkina V.V., Karavaev A.S., Prokhorov M.D., Ispiryan A.Y., Mironov S.A., O.L. Bockeria Low-frequency variability in photoplethysmographic waveform and heart rate during on-pump cardiac surgery with or without cardioplegia // Scientific Reports, 2020, V.10, 2118.

3. Kiselev A.R., Karavaev A.S. The intensity of oscillations of the photoplethysmographic waveform variability at frequencies 0.04–0.4 Hz is effective marker of hypertension and coronary artery disease in males // Blood Pressure, 2020, V.29, N.1, P.55–62.

4. Хэмптон Дж. Р. Основы ЭКГ: пер. с англ. — М.: Мед. лит., 2006 — 224с.

5. Прохоров М.Д., Бодров М.Б., Пономаренко В.И., Гриднев В.И., Беспятов А.Б. Исследование синхронизации между ритмами сердечно-сосудистой системы человека по последовательностям R-R-интервалов. Биофизика. 2005. Т.50. Вып. 5. С. 914-919.

6. Баевский Р.М., Иванов Г.Г., Чирейкин Л.В., Гаврилушкин А.П., Довгалевский П.Я., Кукушкин Ю.А., Миронова Т.Ф., Прилуцкий Д.А., Семенов Ю.Н., Федоров В.Ф., Флейшман А.Н., Медведев М.М. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (методические рекомендации) // Вестник аритмологии. 2001. Т. 24. С.1.

7. А.С. Караваев, методы обработки временных рядов. Учебно-методическое пособие. 2010.

8. А.П. Кулаичев. Компьютерная электрофизиология и функциональная диагностика. Изд. 4-е, перераб. и доп. - М.: ИНФРА-М, 2007, с.370-389.

А. Вязина Д.А. 20.06.2025