

# График спектральной плотности сигнала (PSD)

Спектральный анализ ВСР  
в ЭКГ-сигнале



btl-cis@btlnet.com  
www.btlmed.ru  
www.btlnet.com

# Синдром «эмоционального выгорания», хроническая усталость, нарушения сна и их диагностика с использованием графика PSD

В настоящее время синдрому «эмоционального выгорания» в значительной степени подвержено молодое поколение. Растущая распространенность его различных форм, сопровождающихся хронической усталостью, нарушениями сна и ежедневным утомлением, требует новых диагностических средств. Инструмент построения графика PSD в приборе BTL CardioPoint Holter представляет собой простой и понятный способ параллельной интерпретации активности автономной нервной системы с использованием анализа ВСР (вариабельности сердечного ритма). В то же время он является графической визуализацией степени адаптивности пациента в ситуациях, связанных с физическим или умственным напряжением и стрессом. Этот метод применяется в области клинической медицины для определения правильного лечения и изменения образа жизни, а также в области спортивной медицины для выявления синдрома перетренированности.



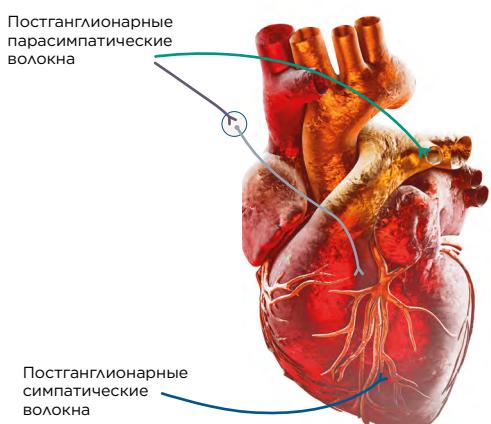
Синдром «эмоционального выгорания» впервые был описан Гербертом Фрейденбергером в 1975 году. Это процесс, в результате которого люди, интенсивно работающие над задачей, теряют энтузиазм, интерес и оптимизм ...

## Автономная регуляция сердечно-сосудистой деятельности

Сердечная деятельность регулируется высокочувствительной вегетативной (автономной) нервной системой (ВНС). Она не контролируется сознанием и не зависит от высшей нервной деятельности. В ее регулировании жизненно важную роль играют симпатический и парасимпатический отделы, которые взаимодействуют друг с другом в динамическом равновесии.

### ПАРАСИМПАТИЧЕСКИЙ ОТДЕЛ (*N. vagus*)

Парасимпатическая нервная система (PSNS) поддерживает жизненные процессы нашего организма в условиях покоя. Висцеромоторные волокна блуждающего нерва уменьшают частоту сердечных сокращений и сократительную способность сердца, а также обычно снижают сократимость коронарных артерий. Они замедляют атриовентрикулярную передачу и снижают общую миокардиальную возбудимость. Помимо сердечно-сосудистой регуляции, за счет парасимпатического отдела усиливается активность пищеварительной и выделительной систем, а также ингибируется активность мышечной и дыхательной систем, что способствует эффективному пищеварению, отдыху и восстановлению организма.



### СИМПАТИЧЕСКИЙ ОТДЕЛ (*Nn. cardiaci*)

Симпатическая нервная система (SNS) активируется главным образом во время физической активности и в стрессовых ситуациях. Влияние симпатического отдела увеличивает частоту сердечных сокращений и сократительную способность сердца. Он ускоряет атриовентрикулярную передачу и повышает возбудимость миокарда. Помимо сердечно-сосудистой регуляции, за счет симпатического отдела также повышается частота дыхания и активность мышечной системы, что способствует увеличению общих жизненных сил организма во время адаптационной реакции на стресс.

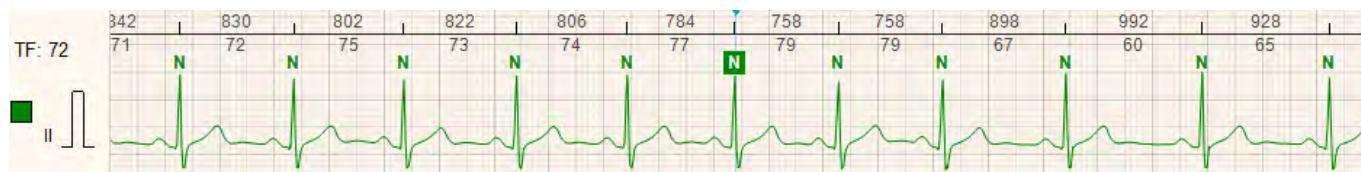
## Значение анализа ВСР

Одной из характеристик сердечной регуляции является ее непостоянность. Изменение ритма сердечных сокращений позволяет подстраиваться под текущие потребности организма. В результате вариабельность сердечного ритма (ВСР) отражает не только механизмы регулирования, но также и влияние многих факторов — наследственности, возраста, пола, физической формы, а также психического состояния человека. Регулирование сердечного ритма почти полностью обеспечивается нервной системой. Синоатриальный узел (SA), который обычно отвечает за частоту сердечных сокращений, находится под постоянным воздействием вегетативной нервной системы (ВНС). Активация симпатического отдела ВНС ускоряет сердечный ритм, но при этом снижает активность парасимпатической нервной системы. ВСР определяется изменением длины интервалов RR при нормальном синусовом ритме.

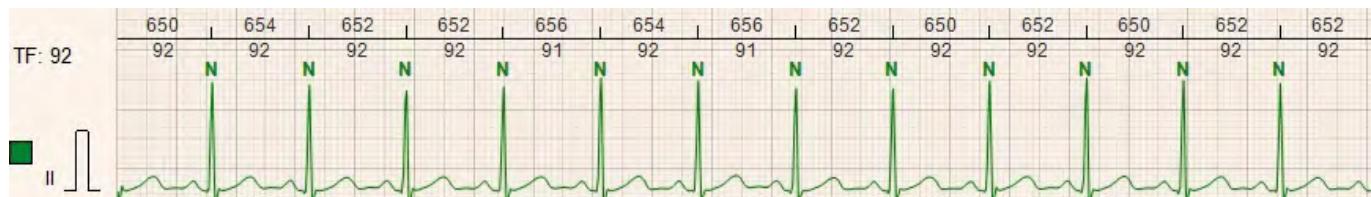


Анализ ВСР основан на определении различий длин интервалов между нормальными последовательными сокращениями. Основным источником информации для анализа ВСР является обычная запись ЭКГ, в которой не должно быть аномальных сокращений. BTL CardioPoint® (компьютерное программное обеспечение для анализа ЭКГ) не учитывает эктопические сокращения и другие артефакты и не использует их для анализа.

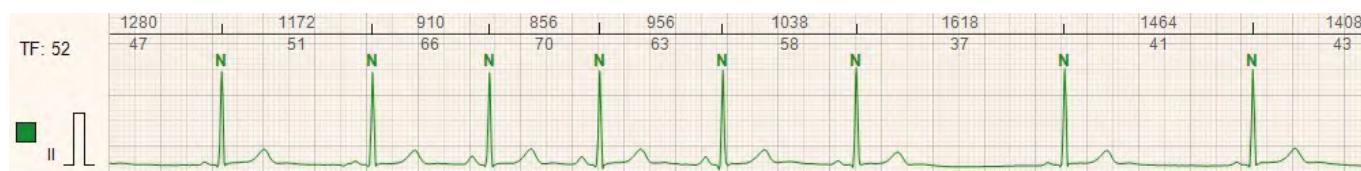
**Синусовый ритм** — нормальная ВСР, нормальное изменение длины интервала RR



**Синусовый ритм** — более низкая ВСР, небольшие изменения в длине интервала RR, сердце пациента «работает» как метроном



**Синусовая аритмия** — существенные изменения длины интервала RR



Графические примеры нормальной ВСР, низкой ВСР и физиологической (дыхательной) синусовой аритмии

Многие авторы описывают ВСР как явление, которое на раннем этапе очень точно может определить разницу между нормой и патологией<sup>1</sup>. Высокая ВСР является показателем хорошей приспособляемости организма и наблюдается у здоровых людей с нормальной вегетативной регуляцией сердечно-сосудистой системы в состоянии покоя. Пониженная ВСР обычно является признаком нарушения адаптивности организма и требует более тщательной диагностики вызвавших ее причин.<sup>2</sup> Пониженная ВСР клинически рассматривается как показатель риска развития сердечно-сосудистых заболеваний или метаболических нарушений.<sup>3</sup>

## Связь ВСР – ВНС

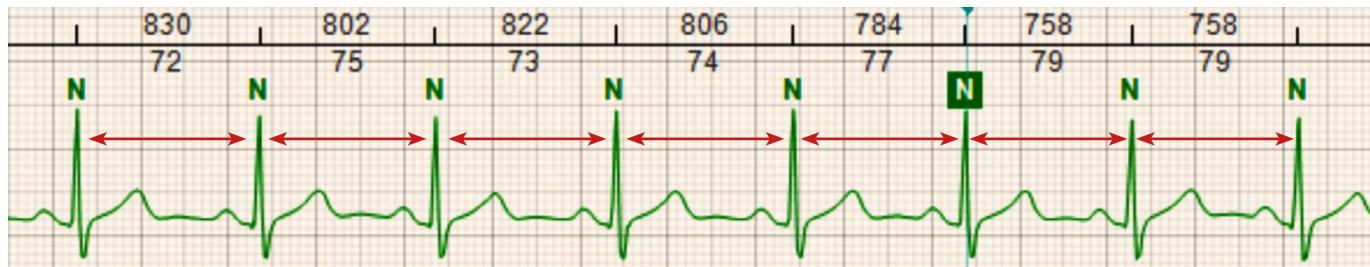
Активность симпатического отдела ВНС преобладает преимущественно во время физической активности или в стрессовых ситуациях, что сопровождается увеличением частоты сердечных сокращений (ЧСС) и снижением ВСР.

Активация парасимпатического отдела ВНС происходит главным образом в состоянии покоя, во время сна и общего восстановления организма, что связано с частотой дыхания и сопровождается снижением ЧСС и повышением ВСР. Постоянно сниженная ВСР может свидетельствовать о проблемах со здоровьем (как упоминалось выше).

## От записи ЭКГ до графика PSD

В настоящее время анализ ВСР позволяет быстро, просто и неинвазивно оценить автономное регулирование организма. Используя так называемое спектральное разложение, можно оценить работу обоих основных отделов — симпатического и парасимпатического. На приведенных ниже рисунках показан процесс получения графика PSD из сигнала ЭКГ простым способом «шаг за шагом».

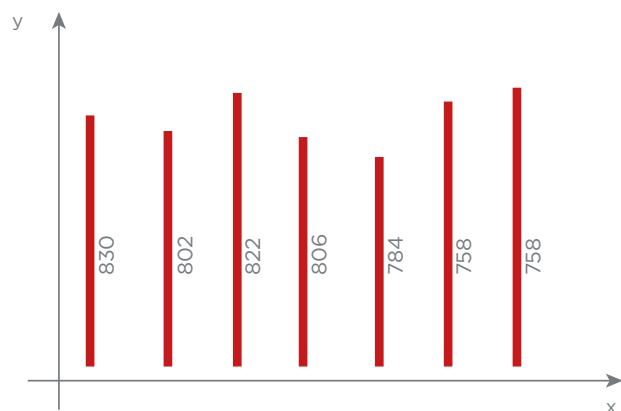
1. На первом этапе измерьте все величины интервалов RR



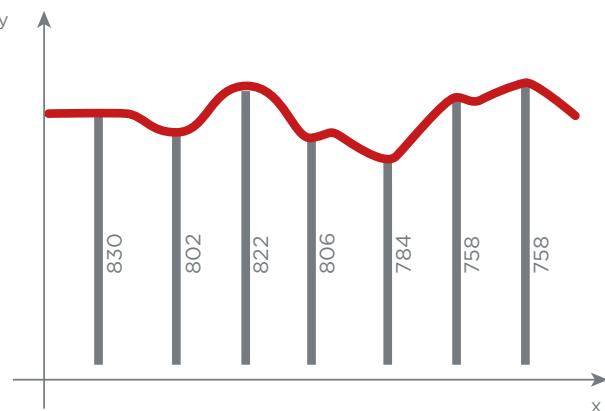
ЭКГ с различными интервалами RR

2. Внесите все измеренные интервалы RR в гистограмму, в которой по оси Y указываются величины интервалов RR.

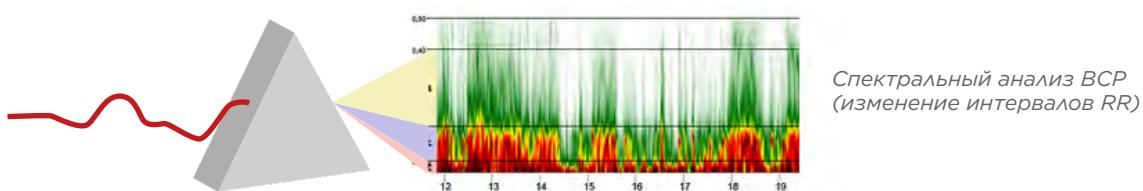
3. Соедините все вершины столбцов и получите кривую для дальнейшего анализа (см. следующий параграф).



Различные интервалы RR на гистограмме



4. Основой спектрального анализа является разделение неупорядоченных данных ВСР (кривая, см. предыдущий пункт) на упорядоченные циклы, представляющие собой колебания ВСР. Симпатический и парасимпатический отделы «работают» вместе с разными частотами. Парасимпатический отдел «реагирует» быстрее, а симпатический медленнее применительно к различным характеристикам их медиаторов (нейротрансмиттеров). На основе этого можно статистически и математически различать и количественно определять так называемую спектральную плотность (мощность) сигнала обоих отделов ВНС. Проще говоря, спектральный анализ можно сравнить с расщеплением светового пучка с помощью призмы. Делая это, мы получаем свечение разных цветов и длин волн. Метод спектрального анализа (преобразование Фурье, FT) расщепляет входной сигнал (кривая из предыдущего пункта) на сумму периодических функций с различными частотами и амплитудами. В итоге в результате спектрального анализа ВСР создается график PSD, который является своего рода его графической интерпретацией.



При использовании метода спектрального анализа соответствующие интервалы RR преобразуются в зоны с различными частотами. Частотный спектр ВСР имеет три основные зоны:

- **HF (зона высокой частоты)** — в диапазоне частот 0,15–0,40 Гц. Этот диапазон определяет активность и быстрые изменения парасимпатического отдела ВНС.
- **LF (зона низкой частоты)** — в диапазоне частот 0,04–0,15 Гц. Этот диапазон определяет активность и медленные изменения симпатического отдела ВНС (с частичной парасимпатической активностью).
- **VLF (зона очень низкой частоты)** — в диапазоне частот 0,01–0,04 Гц. Этот диапазон указывает на активность хеморецепторов и ренин-ангиотензина.<sup>1-2</sup>

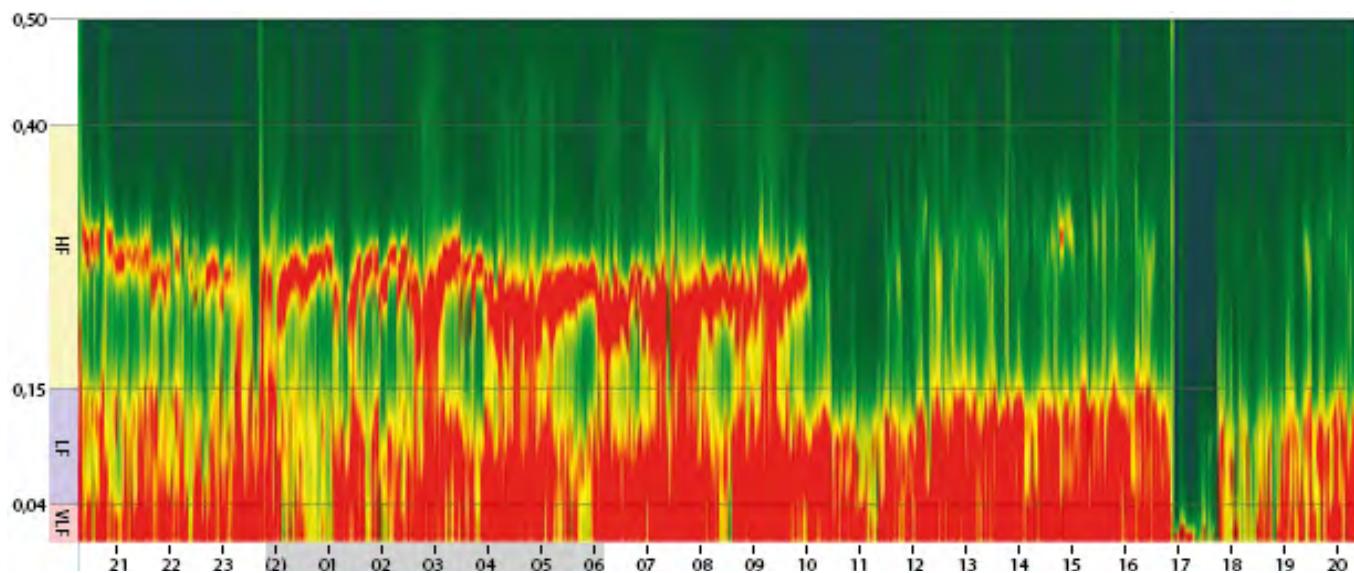


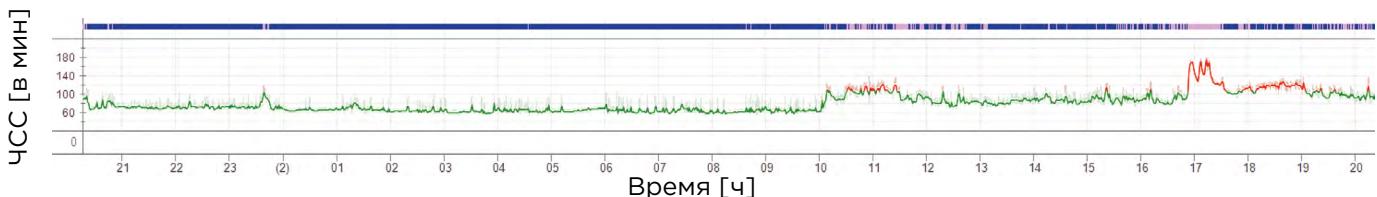
График PSD состоит из оси X (время) и оси Y (частотный диапазон). Деятельность отделов ВНС представлена цветами от светлых до темных оттенков зеленого, желтого и красного. Частотная «мощность» в определенном диапазоне и времени увеличивается в зависимости от интенсивности и плотности цвета следующим образом:

- темно-зеленый — минимальная активность конкретного отдела ВНС,
- желтый — увеличение активности конкретного отдела ВНС,
- красный — темно-красный — значительная активность конкретного отдела ВНС.

## Простой анализ графика PSD

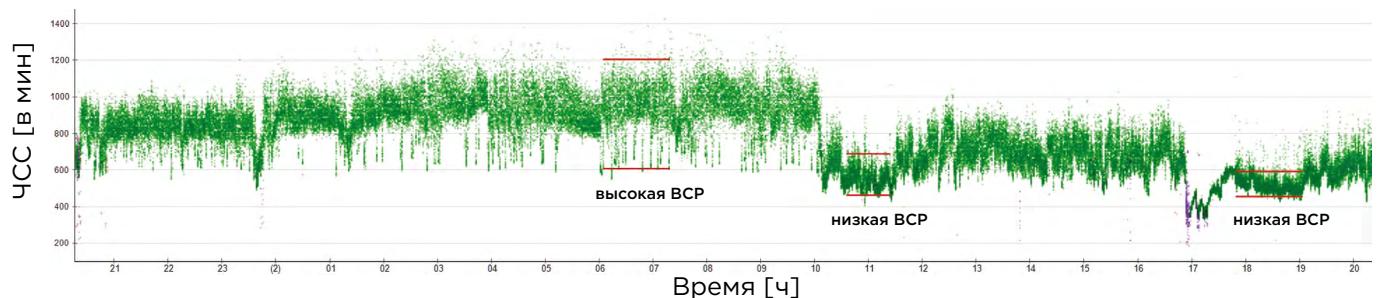
Например: здоровая женщина, 25 лет

### 1. ИНТЕРАКТИВНЫЙ ГРАФИК С ЧСС / АКТИВНОСТЬЮ



Мы следим за изменениями сердечного ритма (ЧСС), связанными с дневной и ночной активностью пациентки. Отмечается нормальный сердечный ритм (зеленый цвет) вечером и ночью во время сна (21.00–9.00). Наблюдается также более высокая ЧСС, связанная с физической активностью пациентки (красный цвет), в течение дня (10.00–11.30 и 17.00–20.00).

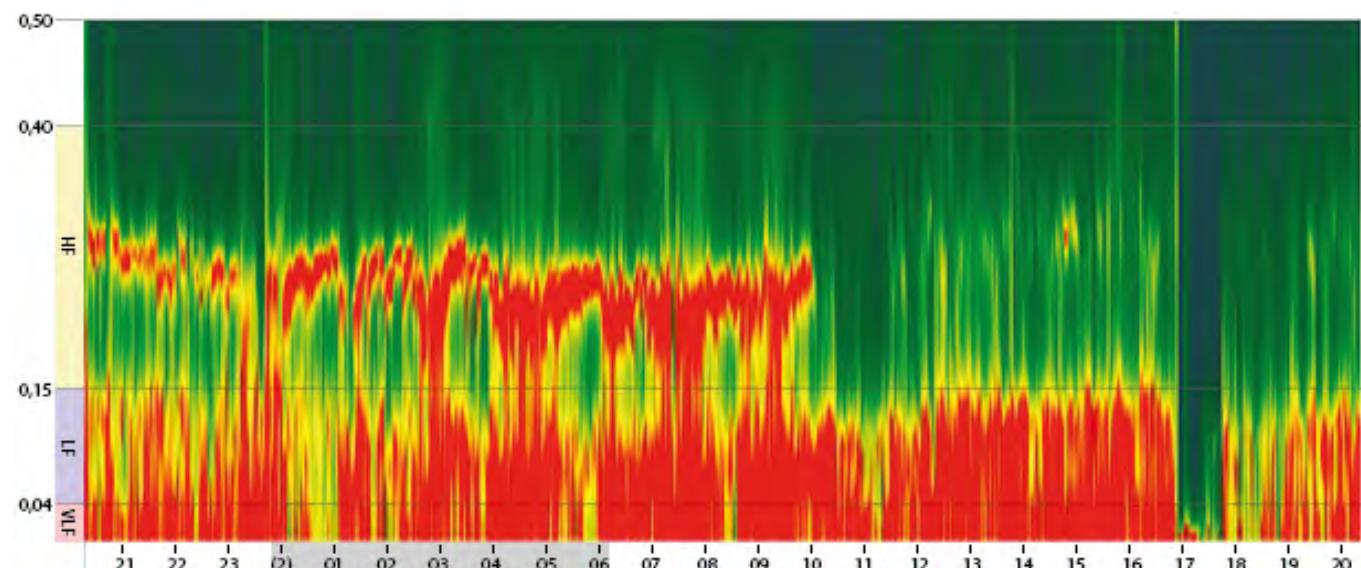
### 2. ТАХОГРАММА – ГРАФИК, ПОКАЗЫВАЮЩИЙ АНАЛИЗ ВСР ПО ВРЕМЕНИ



На тахограмме мы наблюдаем нормальную вариабельность сердечного ритма (ВСР) вечером / ночью. В течение дня утром (10.00–11.30) и во второй половине дня (17.00–19.00) наблюдается снижение ВСР из-за увеличения ЧСС, что, вероятно, связано с физической активностью пациентки.

### 3. ГРАФИК – СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВСР

Важно в первую очередь следить за симпатической активностью в диапазоне LF на графике PSD. Высокая активность означает высокую адаптивность организма в течение дня, то есть пациентка демонстрирует жизненную силу и выносливость. Во-вторых, мы оцениваем парасимпатическую активность в диапазоне HF и так называемый потенциал восстановления пациентки, который сохраняет равновесие между обоими отделами ВНС во время отдыха и сна.



В этом примере спектрального анализа нормальной ВСР мы можем наблюдать высокую общую спектральную мощность в графике PSD. Мы наблюдаем нормальную симпатическую активность в течение дня (диапазон LF) и относительное преобладание парасимпатической активности в ночное время (21.00–10.00, хороший потенциал восстановления пациентки). С 17.00 до 17.40 наблюдается снижение спектральной мощности во всех частотных диапазонах — HF, LF и VLF, что является типичным для физической активности пациентки, сопровождающейся увеличением ЧСС и снижением ВСР.

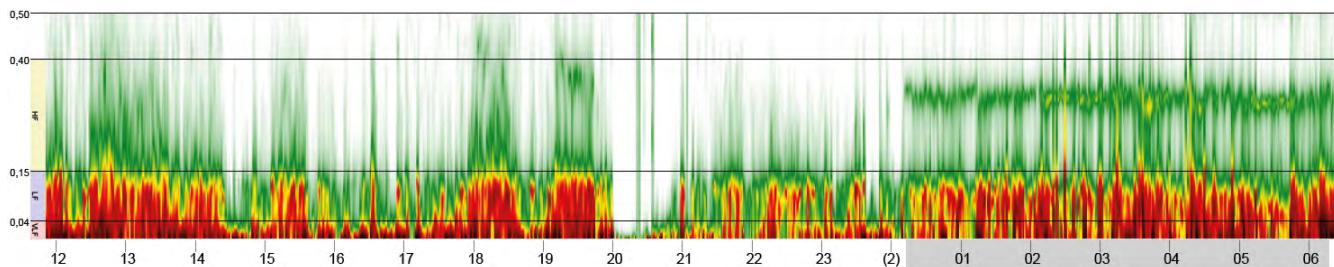
Клиническая интерпретация симпатической и парасимпатической активности ВНС

<b>Частотный диапазон (Гц)</b>	<b>Активный отдел ВНС</b>	<b>Клиническая интерпретация*</b>
HF 0.40 – 0.15	<b>Парасимпатический</b> (активность <i>n. vagus</i> , связанная с дыхательной аритмией)	<p><b>Повышенная активность (оттенки красного цвета)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>повышенная физиологическая активность во время сна (у здоровых людей и спортсменов)</li> <li>отдых и восстановление</li> <li>дыхательная аритмия и гипервентиляция</li> </ul> <p><b>Пониженная активность (зеленые оттенки)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>снижение физиологической активности в течение дня</li> <li>снижение электрической активности сердца</li> <li>хронический стресс</li> <li>сердечно-сосудистые заболевания и расстройства пищеварения</li> <li>физическое напряжение, обучение</li> </ul>
LF 0.15 – 0.04	<b>Симпатический (с частичной парасимпатической активностью)</b> (отражает одновременную симпатическую и парасимпатическую активность и относительный уровень активности вазомоторного центра)	<p><b>Повышенная активность (оттенки красного цвета)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>повышенная физиологическая активность в течение дня</li> <li>физический и умственный стресс</li> <li>ортостатическое напряжение</li> </ul> <p><b>Пониженная активность (зеленые оттенки)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>снижение физиологической активности во время сна (у здоровых людей)</li> <li>усталость, снижение энергетических резервов</li> <li>нарушения сна</li> <li>апатия, невнимательность</li> </ul>
VLF 0.04 – 0.0033	<b>Гуморальная и метаболическая регуляция синусового узла</b> (циркулирующие катехоламины, активность терморецептора / хеморецептора, активность системы ангиотензина ренина, ...)	<p><b>Повышенная активность (оттенки красного цвета)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>гиперадаптивное состояние</li> </ul> <p><b>Пониженная активность (зеленые оттенки)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>дефицит энергии</li> <li>сбой адаптивных механизмов</li> </ul>

\* ЧСС не изолирована, а тесно связана с регуляцией артериального давления, дыхания и другими факторами. Поэтому результаты анализа ВСР должны интерпретироваться в контексте общего клинического состояния пациента и проводимой терапии. Оценка активности отделов ВНС требует определения физиологического или патологического увеличения / уменьшения в данный период времени (день/ночь).

## Иллюстрированные примеры

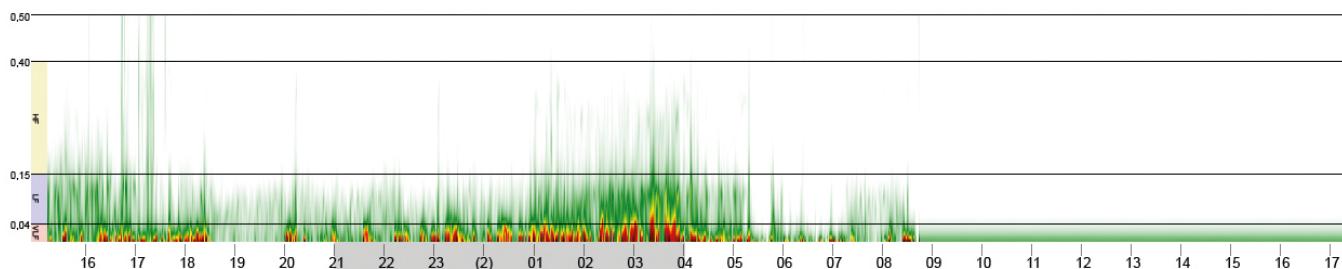
Мужчина, 50 лет



Общая мощность спектра — средняя. Симпатическая активность в диапазоне LF — нормальная в течение дня. Мы наблюдаем относительно большую долю волн в диапазоне HF и преобладание парасимпатической активности. В ночное время у пациента наблюдается хороший потенциал восстановления.

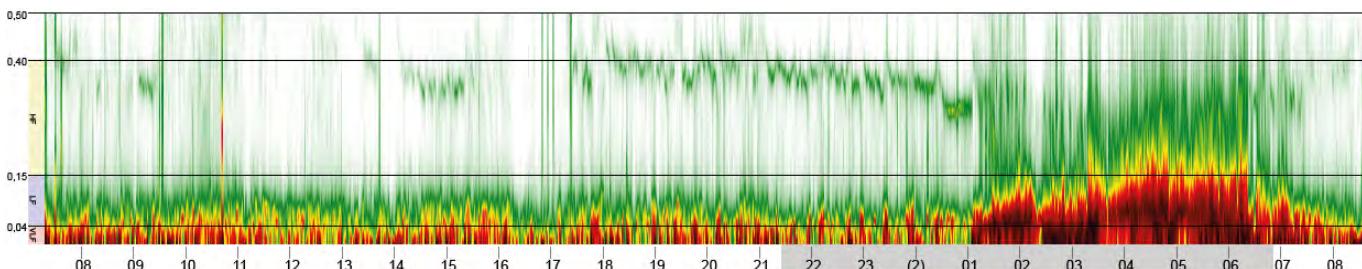
Физическая активность пациента с 20.00 до 21.00 сопровождается более высокой ЧСС и более низкой ВСР. Мы наблюдаем значительное снижение физиологической спектральной мощности во всех частотных диапазонах — HF, LF и VLF.

Мужчина, 50 лет, синдром «эмоционального выгорания»



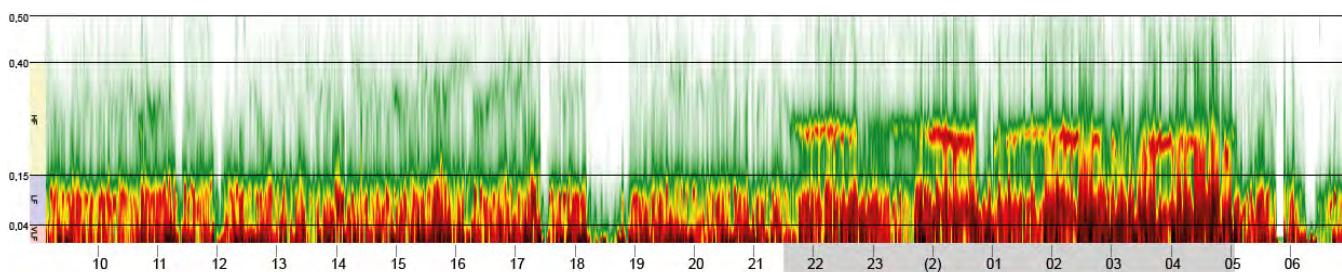
Мы наблюдаем пониженную общую спектральную мощность во всех частотных диапазонах — HF, LF и VLF. И симпатическая, и парасимпатическая активность минимальны. Наблюдается недостаточный потенциал восстановления в ночное время. Между 01.00 и 04.00 утра наблюдается увеличение активности в диапазоне VLF. В целом наблюдается видимое истощение ВНС и неустойчивость сердечно-сосудистой системы к стрессу. Быстрой обратной динамики этих изменений не ожидается. Вероятность быстрого восстановления невелика.

Мужчина, 50 лет



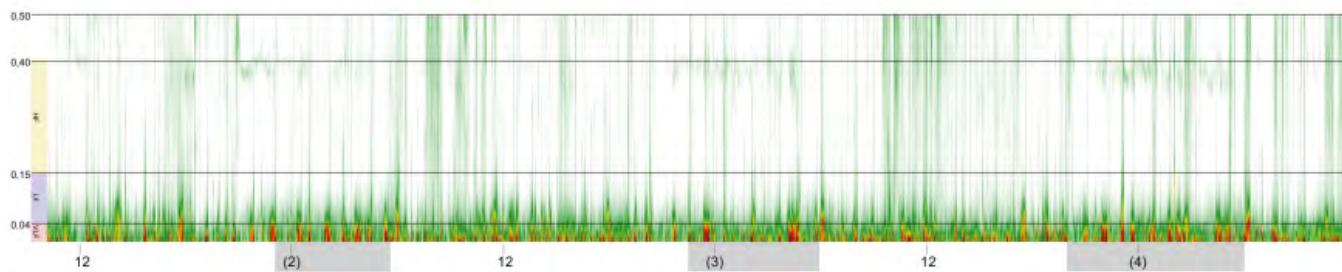
Спектральная мощность в частотных диапазонах HF, LF у пациента снижена в течение дня. Сниженная симпатическая активность видна в диапазоне LF в течение дня и значительно увеличивается ночью и ранним утром.

Мужчина, 27 лет



Общая спектральная мощность у пациента нормальная. Симпатическая активность в течение дня нормальная, а ночью наблюдается относительное увеличение мощности высокочастотной волны (HF) и полезного потенциала восстановления. Между 18.00 и 19.00 наблюдается снижение спектральной мощности во всех частотных диапазонах — HF, LF и VLF, что, вероятно, связано с физической активностью пациента (более высокая ЧСС, более низкая ВСР).

Мужчина, 80 лет (3-дневная запись ЭКГ)



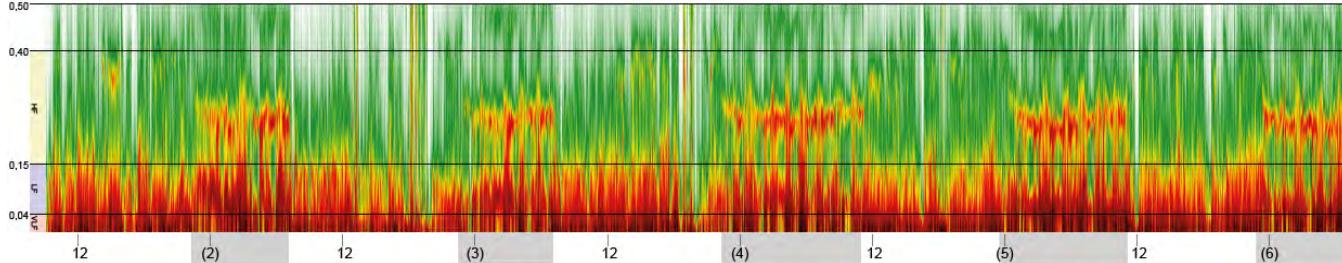
В случае этого пациента видно крайнее понижение спектральной мощности во всех частотных диапазонах. Наблюдается минимальная флюктуация частоты применительно к нормальной активности организма (хронотропная некомпетентность). Мы не можем устраниить изменения ВНС или снижение активности гуморально-метаболической системы. Необходимо учитывать возраст и возможное медикаментозное лечение.

## Иллюстрированные примеры, взятые у спортсменов

Связь ВСР и ВНС делает возможным использование графика PSD также в целях спортивной диагностики для достижения более высоких спортивных результатов<sup>5</sup>. В частности, это помогает:

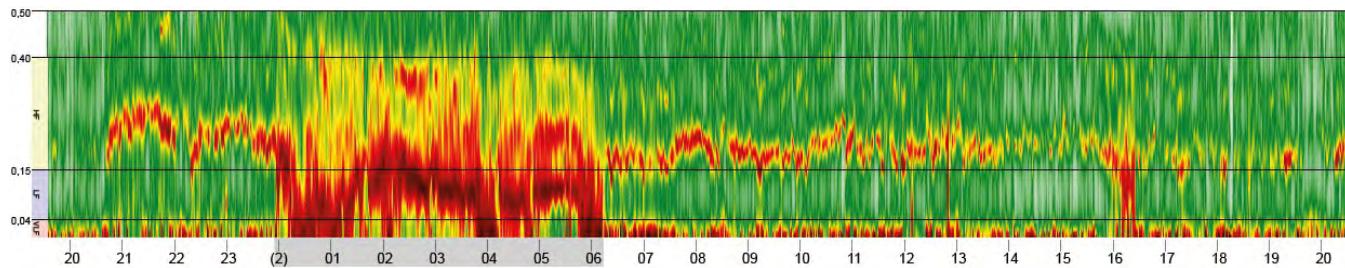
- определить (не)достаточное восстановление,
- определить возможный синдром перетренированности,
- определить динамику процессов тренировок, чтобы оптимизировать их,
- определить периоды, когда спортсмен более подвержен заболеванию/ травме,<sup>6</sup>
- определить степень индивидуальной адаптации к физической нагрузке,
- определить подготовленных и перспективных спортсменов,<sup>7</sup>
- определить людей, для здоровья которых занятие каким-то видом спорта представляет риск.

Мужчина, 16 лет, спортсмен



Общая спектральная мощность — высокая, в среднем наблюдается относительное преобладание высокочастотных (HF) волн и более высокая парасимпатическая активность. Пациент демонстрирует хороший потенциал восстановления во время сна.

18 лет, спортсмен, синдром перетренированности



В данном конкретном случае мы наблюдаем:

Общая мощность спектра несколько понижена в течение дня (значительное снижение низких частот с преобладанием высокочастотных волн). Мы наблюдаем значительное увеличение общей спектральной мощности и, очевидно, более высокую активность обоих отделов ВНС в ночное время.

График PSD у этого спортсмена позволяет определить синдром перетренированности с признаками снижения активности симпатического отдела в течение дня (во время тренировки) и симпатической гиперактивностью ночью (необходимо учитывать возможность ортостатического напряжения), со слабым потенциалом восстановления. Для тренера важно определить причины такого состояния спортсмена и своевременно оптимизировать программу тренировок. Общие симптомы синдрома перетренированности включают в себя: снижение симпатической активности, снижение энергии, хроническую усталость, нарушение сна и вялость в течение дня.

## Выводы

График спектральной плотности сигнала (PSD) в системе BTL CardioPoint Holter представляет собой простой и понятный способ интерпретации активности вегетативной нервной системы с использованием анализа ВСР. Он визуализирует степень адаптивности пациента к ситуациям, связанным с физическим или умственным напряжением и стрессом. Полная запись может быть просмотрена сразу, поэтому график PSD обеспечивает быстрое и простое средство определения состояния здоровья пациента.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Thayer JF, Ahs F, Fredrikson M et al: *A meta-analysis of heart rate variability and neuroimaging studies: implications for heart rate variability as a marker of stress and health.* Neurosci Biobehav Rev, 2012;36(2):747-56.
- 2 Dekker JM, Crow RS, Folsom AR et al: *Disease and mortality from several causes: The ARIC study.* Circulation, 2000;102:1239-1244. doi: 10.1161/01.CIR.102.11.1239
- 3 Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology: *Heart rate variability – standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use.* Circulation 1996; 93: 1043-1065.
- 4 Pumprla J. *Variabilita srdeční frekvence: význam měření pro praxi.* Kapitoly z kardiol 2001; 3: 66-70.
- 5 Aubert AE, Seps B, Beckers F. *Heart rate variability in athletes.* Sports Med. 2003;33(12):889-919
- 6 Gisselman AS, Baxter GD, Wright A, Hegedus E, Tumilty S. *Musculoskeletal overuse injuries and heart rate variability: Is there a link?* Med Hypotheses. 2016 Feb;87:1-7
- 7 Flatt AA. *HRVtraining.* 2016. *Heart Rate Variability Explained: Part 1 / HRVtraining.* [ONLINE] Available at:<https://hrvtraining.com/2012/01/16/heart-rate-variability-explained-part-1/>. [Accessed 06 September 2016].



ECG



STRESS



CPET



HOLTER



ABPM



SPIRO

## О программе BTL CardioPoint

BTL CardioPoint является универсальным программным обеспечением для интеграции модулей ЭКГ покоя, нагрузочного тестирования, суточного мониторирования ЭКГ по Холтеру, суточного мониторирования артериального давления и спирометрии на основе унифицированной платформы с единой базой данных пациентов и одинаковой логикой управления для каждого модуля. Программа имеет полностью настраиваемый интерфейс, ее макет и этапы работы легко адаптируются. Оператор может произвольно добавлять или перемещать таблицы, кривые ЭКГ и другие окна. Быстрота работы обеспечивается эргономичным, интуитивно понятным пользовательским интерфейсом с «горячими» клавишами и повышенной чувствительностью к движению «мыши». Цветовые схемы предназначены как для темных, так и для светлых помещений. BTL CardioPoint можно использовать и в качестве отдельной кардиологической системы, но она также может быть легко внедрена в существующую амбулаторную или больничную систему. BTL CardioPoint — это программное обеспечение, которое приспосабливается к пользователю, а не заставляет пользователя приспосабливаться к себе.

btl-cis@btlnet.com  
www.btlmed.ru  
www.btlnet.com

592-77PSDGRAPHRU101

2017 © BTL