

ДИНАМИКА ВЕГЕТАТИВНОЙ РЕГУЛЯЦИИ КАРДИРИТМА ПРИ СТРЕСОГЕННЫХ КОГНИТИВНЫХ, ЭМОЦИОНАЛЬНЫХ И ФИЗИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Бахчина А.В., Парин С.Б., Полевая С.А.

*Научно-исследовательский институт прикладной и фундаментальной медицины
Нижегородской государственной медицинской академии*

Любое сенсорное событие вызывает реакцию в четырех взаимосвязанных физиологических модулях: эмоционально оценочного, когнитивного, моторного и вегетативного, функцией которого является оптимальное ресурсообеспечение предыдущих трех модулей. При этом чрезмерная нагрузка на эти модули запускает стресс-реакцию.

Ключевые слова: аффективные стресс-факторы, вариабельность сердечного ритма, индекс вегетативного баланса.

Введение

Стресс – является неспецифической системной защитной реакцией организма на повреждение или его угрозу [6-8, 10]. Повреждение или угроза повреждения на системном уровне отражаются в сигнале о чрезмерном рассогласовании двух сравниваемых образов. Основываясь на теории функциональных систем П.К.Анохина, мы предлагаем следующую классификацию стресс-факторов – экзогенных и эндогенных факторов, приводящих к запуску стресс-реакции. В зависимости от блока функциональной системы, в котором возникает чрезмерное рассогласование можно разделить все стресс факторы на информационные – чрезмерное рассогласование возникает в блоке принятия решения или на этапе афферентного синтеза. Примером здесь могут служить – принятие решения в короткое время, принятие решения в новой ситуации, когда отсутствует готовая программа действий, тест Струпа – классическая модель когнитивного конфликта на этапе афферентного синтеза. Физические стресс-факторы – чрезмерное рассогласование возникает на этапе реализации выбранной программы действий. В данном случае в качестве примера можно привести ситуацию, когда количество экзо- и эндогенных ресурсов для реализации действия не хватает. Аффективные стресс-факторы – возникновение чрезмерного рассогласования в акцепторе результата действия или на этапе афферентного синтеза. Так, например, в ситуациях повышенной субъективной значимости возрастает цена ошибок

и пороги чрезмерности величины рассогласования снижаются. Таким образом, рассматривая континuum функциональных систем, возникновение чрезмерного рассогласования в любом блоке одной функциональной системы приводит к формированию новой защитной по своей функции функциональной системы, реализующей стресс-реакцию.

При этом все функциональные процессы отражаются в динамике сердечного ритма, так как в основе его регуляции лежат как автономные так и надсегментарные нервные структуры (рис.1.).

Одним из самых распространенных и общепринятых аппаратных методов диагностики функционального состояния является оценка вариабельности сердечного ритма (ВСР). Согласно современным представлениям, вегетативная регуляция кардиоритма отражает уровень активизации и напряжения систем организма. 50-ти летний опыт изучения ВСР как совокупности характеристик системы регуляции демонстрирует чувствительность данного параметра к любым изменениям в психических или физиологических состояниях живого объекта, что согласуется с изначальной идеей Клода Бернара о нейрокардиальных связях. Данный факт подтверждается как эмпирическими исследованиями измерения ВСР в контекстах информационной, физической и интегральной нагрузок [1, 2], так и целенаправленными работами по определению связи параметров ВСР с активностью различных нейрональных структур методами нейровизуализации (fMRI, ПЭТ) [1, 2]. Современные исследования предос-

тавляют обширную базу результатов измерения ВСР в разных группах испытуемых: больные депрессивными расстройствами, постинсультные больные, страдающие диабетом и др. [1-3] и в разных экспериментальных лабораторных контекстах: утомление, перенапряжение, разные виды стресса: экзаменационный, рабочий и др. [1, 2]. Интеграция имеющихся данных приводит, в итоге, к выводу о неспецифичности изменений ВСР под воздействием негативных экзогенных и эндогенных факторов, что выступает в пользу гипотезы о наличии информативных маркеров стресса (неспецифической реакции организма) в динамике ВСР.

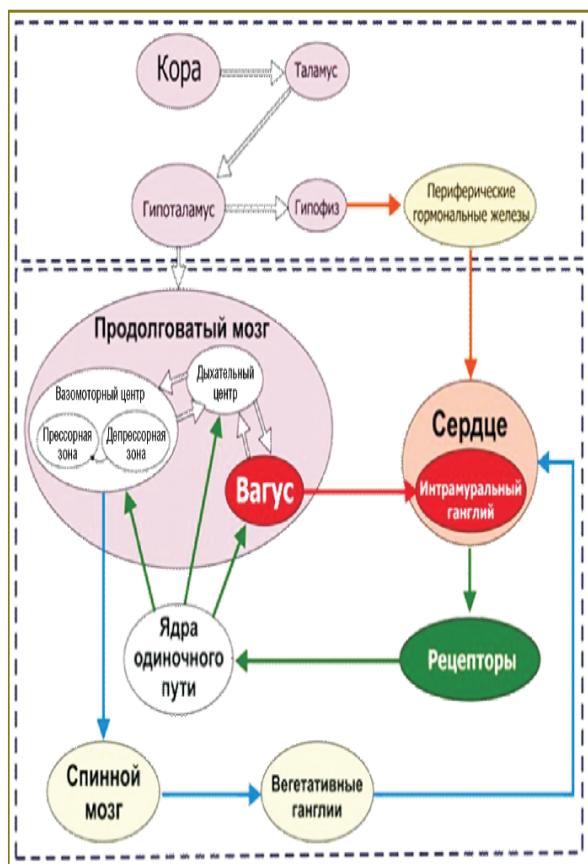


Рис.1. Двухконтурная модель нервногуморальной регуляции сердечного ритма [3, 6-8].

Однако исследования ВСР содержат в себе ряд, на наш взгляд, ограничений. К этим ограничениям можно отнести следующее. Измерения кардиоритма как правило проводятся в лабораторных условиях в стационарных контекстах, в результате, полученные данные не всегда позволяют

предсказать динамику режима работы организма человека в контексте естественной деятельности [4, 5]. Кроме того в исследованиях редуцируется понятие динамики, то есть под динамикой состояния как правило понимают срезы во времени – например до и после какого-либо воздействия, при этом не рассматриваются и не учитываются изменения, сопровождающие сам процесс. Эти ограничения можно снять, если реализовать следующую схему эксперимента – необходимо параллельно контролировать динамику контекста естественной деятельности и режим работы биологической системы для последующего их сопоставления.

Таким образом, целью данной работы стало исследование вегетативных компонентов функциональной системы, обеспечивающей целенаправленное поведение человека в стрессогенных контекстах. С этой целью были поставлены следующие задачи: разработка технологии дистанционной регистрации физиологических сигналов человека, обеспечивающей минимизацию рисков нарушения целостности функциональной системы, то есть само измерение не должно включаться в функциональную систему, реализующую деятельность, и затрачивать когнитивные ресурсы человека. Адаптация математического инструментария для анализа нестационарных фрагментов ритмограмм: поскольку физиологические сигналы, полученные при измерении человека в контексте естественной деятельности, обладают свойством нестационарности и содержат внутри себя много переходных процессов, то для их анализа требуются специализированные математические методы. Исследование динамики вегетативной регуляции кардиоритма при аффективных, когнитивных, эмоциональных и физических нагрузках. Поиск вегетативных динамических маркеров для экстремальных нагрузок разного рода.

Методы исследований

В измерениях в каждом контексте реализуется схема параллельного контроля параметров биологической системы – вариабельность сердечного ритма, и контекста – внешние стимулы.

Измерение вариабельности сердечного ритма (ВСР). Измерение ВСР производилось по средствам телеметрической системы регистрации сердечного ритма [9]. Данная система представляет из себя миниатюрный датчик ZephyrBioHarness, который крепится к эластичному поясу, в который вшиты два тканевых электрода. Пояс крепится на тело человека таким образом, что бы электроды располагались в 1 и 2 грудных отведении. Размер пояса устанавливается таким, что бы испытуемому было комфортно и при этом различные движения не влияли на положение пояса.

Пакетная передача данных от датчика к мобильному девайсу производится по беспроводному протоколу Bluetooth. Реализация связи, передачи и сохранения данных производится на мобильном устройстве через специализированное программное обеспечение – «HR-Reader». Программная среда «HR-Reader» обеспечивает on-line визуализацию регистрируемой динамики RR-интервалов для контроля чистоты и целостности записи. Интерфейс программы включает кнопки (A, B, C, D, E, F) для контекстно-временного маркирования записи. Нажатие кнопки ставит соответствующий маркер напротив RR-интервала, во время которого произошло событие, сохраняя маркер в файле данных.

Фиксация контекста. Контекст фиксируется следующими методами:

1. Временное протоколирование;
2. Протоколирование событий вождения автотранспорта осуществлялось через заполнение бланка протокола (протокол движения был разработан для временной записи событий, сопровождающих процесс вождения, отражающих уровень напряжённости деятельности), а так же через маркирование записи физиологического сигнала средствами программного обеспечения, описанными выше, наблюдателем. Наблюдатель располагался на переднем сидении в салоне автобуса для устранения возможности вмешательства в деятельность водителя. В функции наблюдателя входили контроль измерения физиологических параметров и протоколирование процесса движения.

3. Маркирование записей.

Регистрация начала и окончания события в контекстах производилась через маркирование записи ритмограммы по средствам кнопок (A, B, C, D, E, F) в программе регистрации сигнала. События контекста заранее кодируются в представленных буквах. Маркеры фиксируются в записывающем файле напротив RR-интервала, совпадающего по времени с нажатием маркера.

Математический анализ кардиосигнала. Для обработки данных использованы спектральные (периодограммный метод) и статистические методы анализа вариабельности сердечного ритма, метод непрерывного вейвлет-преобразования.

Для оценки уровня вегетативного обеспечения определялись следующие традиционные показатели: частота сердечных сокращений (ЧСС), 1/с; средняя длина RR-интервала (мс); стандартное отклонение средней длины RR-интервала (SDNN), мс; общая мощность спектра (TP), мс²; мощность волн низкой частоты (LF), мс²; мощность волн высокой частоты (HF), мс²; коэффициент симпато-вагусного баланса, представляющий отношение мощности низкочастотного диапазона к мощности высокочастотному диапазону спектра вариабельности сердечного ритма (LF/HF).

С учетом специфики кардиосигнала, полученного в контексте естественной деятельности, а именно наличия в нем свойства нестационарности и большого количества переходных участков, выбран набор нетрадиционных спектральных методов обработки сигналов, синтез которых позволил выделить нетривиальные аспекты регуляции сердечного ритма:

1. Анализ диапазона спектра ритмограммы от 0,6 до 2 Гц. Информативность этого диапазона для контроля функционального состояния убедительно доказана для контекста послеоперационного восстановления. Исследования демонстрируют наличие сверхвысокочастотных компонентов (VHF – very high frequency) в структуре спектра

вариабельности сердечного ритма не только у больных, но и у здоровых людей. Мы предполагаем, что сверхвысокочастотные компоненты спектра отображают постоянную частоту собственных колебаний сердца и моды, связанные с системными регуляторными воздействиями. В работе использовались следующие показатели высокочастотного диапазона спектра ВСР: 1. Частота колебаний с максимальной мощностью (ПЧ); 2. Мощность данной частоты (МПЧ); 3. Размах максимальной по мощности частоты: ПЧмин, ПЧмакс, ΔПЧ.

2. Метод непрерывного вейвлет – преобразования (НВП) (вейвлет Морле). НВП использовали для анализа амплитудных модуляций RR-интервалов и спектральных компонент ритмограмм.

Метод оценки амплитудных модуляций спектральных компонент ритмограмм включает следующие шаги:

- 1 Анализ ритмограмм методом НВП, в результате которого получали вейвлет-спектрограмму;
- 2 Выделение на вейвлет-спектрограмме в диапазонах LF и HF узких полос частот (0,005 Гц), в которых рассматривали зависимости вейвлет-коэффициентов (W2) от времени;
3. Статистическая и спектральная оценка полученного временного ряда – W2(t) – (при этом дополнительным методом оценки выступал периодограммный метод).

Для анализа быстрых изменений в структуре сердечного ритма использован динамический спектральный анализ, в результате которого мы получали временную динамику мощностных характеристик спектров колебаний RR-интервалов, а именно: суммарную мощность спектра вариабельности сердечного ритма – ТР (mc²), мощность спектра ритмограмм в области низких частот – LF (mc²), мощность спектра ритмограмм в области высоких частот – HF (mc²), соотношение мощностей спектра ритмограмм в области низких и высоких

частот (индекс вегетативного баланса (ИВБ)) – LF/HF.

Статистические методы обработки данных. Статистическую обработку результатов проводили при помощи программ Microsoft Excel и Statistica 6.0 с использованием средств: параметрические критерии (t-критерий Стьюдента), кластерный анализ (кластеризация методом K-средних), дисперсионный анализ (многомерный метод дисперсионного анализа повторных измерений), корреляционный анализ.

Результаты исследований и их обсуждение

Индивидуальный мониторинг ВСР в контексте публичного выступления показал у 97% испытуемых одновременное снижение общей мощности ритма (ТР) и возрастание индекса вегетативного баланса - LF/HF (ИВБ). Данная динамическая структура следует за всплеском общей мощности колебаний, который возникает в момент начала выступления. По окончании данного контекста наблюдается обратная динамика – снижение ИВБ на фоне возрастания общей мощности, далее динамика этих параметров возвращается к близкому к исходному среднему уровню (рис.2).

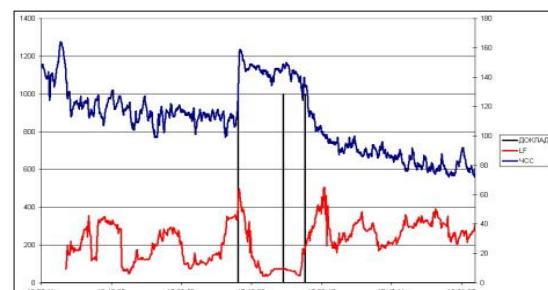
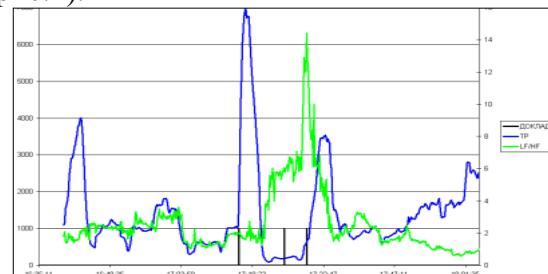


Рис.2. Индивидуальная динамика параметров ВСР испытуемого в контексте публичного выступления

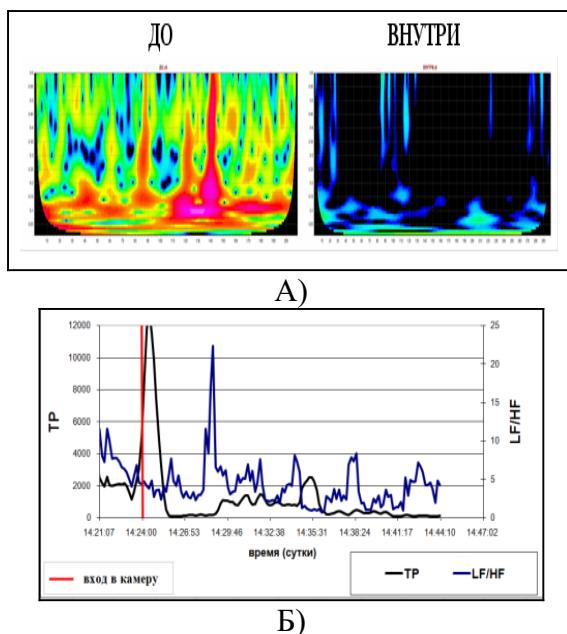


Рис.3. А - Вейвлет-спектрограммы динамики RR-интервалов испытуемого в контексте до и внутри газово-дымовой камеры, Б – динамика частотных характеристик ВСР (TP, LF/HF) испытуемого при входе в газово-дымовую камеру.

Описанная динамическая структура наблюдается на фоне возрастания ЧСС (маркер симпатической активации) и воспроизводится у сотрудников МЧС при обучении в газово-дымовой камере (рис.3) и испытуемых, играющих в компьютерные игры, в ситуациях ошибочных действий [9].

Таким образом, по динамической структуре спектральных характеристик ВСР в стрессогенном контексте можно определить следующую вегетативную реакцию: 1. Этап активации систем регуляции (возрастание общей мощности с преобладанием мощности в низкочастотной компоненте LF). Предположительно можно связать данную фазу с симпатоадреналовой активацией. 2. Сменяет этот этап доминирования симпатической регуляции (возрастание ИВБ) на фоне резкого снижения общей мощности ритма (TP), данная динамика может объясняться включением второго звена стресс реакции – эндогенной опиоидной системы, которая, обладая гипобиотическими свойствами, начинает взаимосвязанную работу с симпатоадреналовой системой.

По типичной динамике общей мощности спектра ТР и ИВБ у водителей общественного транспорта во время движения, были идентифицированы непредсказуемые события, которые вызывают стрессовую реакцию организма. В контексте вождения автотранспорта выделено 4 группы событий, выстроенных по степени предсказуемости в процессе движения:

- посадка – высадка пассажиров. Моменты начала и окончания остановки в формально обозначенных пунктах маршрута автобуса. Данные события являются стандартными в маршруте – плановыми, предсказываемыми водителями.

- светофор. Моменты начала и окончания остановки движения по причине красного сигнала светофора. Данные события являются внеплановыми, случайно возникающими в процессе движения. Однако, предупреждающие сигналы светофора (мигание зелёного, загорание жёлтого сигнала) позволяют частично предсказывать необходимость остановки.

- пробка. Моменты начала и окончания остановки движения по причине дорожного затора. Данное событие является внеплановым в процессе движения, нарушающим стандартную скорость прохождения маршрута, что в результате может привести к достижению конечной точки рейса с запозданием во времени.

- манёвр. Моменты нестандартных, сложных дорожных ситуаций: неожиданной вынужденной остановки, подрезание пути со стороны других участников движения, сложные повороты и др. Данные события, являющиеся наиболее непредсказуемыми и внезапными в процессе движения, требуют мобилизации ресурсов водителя для их преодоления.

Обнаружены значимые различия в частотных параметрах ВСР, сопровождающих разные (по степени предсказуемости) события (Таблица 1). Мощности всех компонент спектра ритмограммы (TP, VLF, LF, HF)

возрастают значимо выше при наступлении не предсказанных событий, при этом ИВБ сохранен. Эти результаты демонстрируют первый этап стресс-реакции, описанный выше.

Таблица 1

Значение спектральных показателей ВСР при предсказуемых и непредсказуемых событиях

Показатели	Предсказуемые события	Непредсказуемые события
TP, мс ²	649,1 (313,0)	1396,2 (459,4)*
VLF, мс ²	203,0 (117,5)	746,7 (479,2)*
LF, мс ²	137,5 (78,9)	423,7 (233,8)*
HF, мс ²	39,2 (12,8)	109,3 (38,9)*
LFn, %	75,0 (8,7)	75,6 (11,8)
HFn, %	25,0 (8,7)	24,4 (11,8)
LF/HF	3,7 (2,3)	4,3 (2,7)

Примечание: * - p<0,01.

В динамике частотных характеристик ВСР испытуемых максимально непредсказуемое событие – манёвр запускает описанную выше структуру (рис.4). При этом, важно отметить, что в ситуациях с более высоким уровнем определённости (светофор) наблюдается параллельная, положительно коррелированная динамика ТР и ИВБ – возрастание.

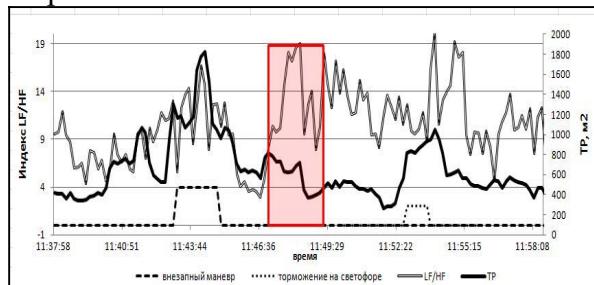


Рис.4. Динамика частотных характеристик ВСР (TP, LF/HF) водителя

Заключение

Таким образом, стадии стресс реакции воспроизводятся в динамических структурах частотных параметров ВСР, такие маркерные структуры неспецифичны к природе стрессогенного контекста. При этом для первой стадии характерны два, следующих друг за другом этапа: 1. Возрастание общей мощности спектра ВСР (TP) с одновременным возрастанием мощности низкочастотной компоненты

(LF), что соответствует резкому всплеску симпатоадреналовой активации; 2. Возрастание ИВБ с одновременным резким снижением общей мощности спектра ВСР, что соответствует включению второго звена стресс-реакции – эндогенной опиоидной системы.

Вне стрессового контекста изменения общей мощности спектра ВСР и ИВБ параллельны, положительно коррелируют. До сих пор стоит задача определения маркеров последовательных стадий стресс-реакции в сложных динамических структурах частотных характеристик ВСР. Полученные результаты требуют подтверждения посредством фармако-физиологического анализа.

Литература

1. Acharya U.R., Kannathal N., Sing O.W., Ping L.Y., Chua T. 2004 Heart rate analysis in normal subjects of various age groups // Biomed Eng Online. Jul. V. 20, № 3(1). P. 24.
2. Thayer J.F., Åhsc F., Fredrikson M., Sollers J.J., Wagere T.D. 2012 A meta-analysis of heart rate variability and neuro-imaging studies: Implications for heart rate variability as a marker of stress and health. Neuroscience and Biobehavioral Reviews 36, 747–756.
3. Баевский Р.М. 2004 Анализ вариабельности сердечного ритма: история и философия, теория и практика // Клиническая информатика и телемедицина: № 1(1). С. 54–64.
4. Барабанщиков В.А. Экспериментальная психология в России. // М.:Институт психологии РАН; 2010, с. 13-18.
5. Крылов А.К. , Александров Ю.И., Погружение в среду как альтернатива методике предъявления стимулов: модельное исследование // Психологический журнал. 2007. Т.28. №2. С.106-113.
6. Парин В.В., Космолинский Ф.П., Душков Б.А. 1970 Космическая биология и медицина // М.: Просвещение, 220 с.
7. Парин С.Б. 2008 Люди и животные в экстремальных ситуациях: нейрохимические механизмы, эволюционный ас-

- пект // Вестник НГУ. Т. 2, вып. 2. С. 118–135.
8. Парин С.Б., Чернова М.А., Полевая С.А. 2011 Адаптивное управление сигналами о рассогласовании в когнитивных процессах: роль эндогенной опиоидной системы // Известия вузов: Прикладная нелинейная динамика. Т. 19, № 6. С. 65–73.
 9. Полевая С.А., Некрасова М.М., Рунова Е.В., Бахчина А.В., Горбунова Н.А., Брянцева Н.В., Кожевников В.В., Шишалов И.С., Парин С.Б. Дискретный мониторинг и телеметрия сердечного ритма в процессе интенсивной работы на компьютере для оценки и профилактики утомления и стресса - Медицинский альманах – Нижний Новгород: Изд-во «Ремедиум Приволжье», № 2 (26). - 2013. – С. 151-155.
 10. Селье Г. 1960 Очерки об адаптационном синдроме / пер. с англ. М. : Медгиз,, 275 с.

DYNAMICS OF CARDIAC VEGETATIVE REGULATION IN STRESS COGNITIVE, EMOTIONAL AND PHYSICAL LOADS¹

Bakhchina A.V., Parin S.B., Polevaya S.A.

Any sensory event causes a reaction in four interrelated physiological modules: emotional, cognitive, motor and vegetative which function is the optimal provision of resources the previous three modules. Thus an excessive load on the modules causes stress response.

Keywords: affective stressors, heart rate variability, vegetative balance index.

¹ Статья подготовлена к публикации по итогам третьей всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях» и представляет собой дополненный по итогам дискуссии доклад, представленный на этой конференции.