

Журнал высшей нервной деятельности , 1999. Т.48, (6) 345-350

УДК 612.776.1 + 612.821 + 616.12-008.318

**Вариабельность ритма сердца и характер обратной связи по
результату операторской деятельности у человека**

Каплан А.Я.

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова.

E-mail: akaplan@mail.ru

Оценивание вариативности межсистолических интервалов (МСИ) является одним из наиболее практичных подходов для изучения механизмов психо-соматического сопряжения в процессе информационно-аналитической деятельности человека [1,3 и др.]. Известно, что умеренному нервно-психическому напряжению, например, при выполнении задач операторского типа, как правило сопутствует стабилизация ритма сердца [1,2,3,7]. Однако остается не ясным, что является доминирующей причиной подобного "вегетативного" отклика организма при решении трудной задачи: необходимость поддержания на высоком уровне производительности процессов восприятия и переработки информации или эмоциональная компонента, связанная с непрерывным оцениванием результативности заданной деятельности [4].

В настоящей работе сделана попытка отдельного анализа когнитивного и оценочно-эмоционального компонентов операторской деятельности человека, в отношении динамики индексов вариационной пульсометрии (ВП). В качестве операторской задачи за основу была взята модифицированная и реализованная на компьютере классическая парадигма Стернберга [9]. Испытуемый должен был как можно быстрее нажать на кнопку, если экспонируемое на экране двухзначное число находилось в списке ранее предъявленных трех чисел-эталонов.

Длительность экспозиции каждого из чисел составляла 250 мс, а задержка между предъявлением списка эталонных чисел и тестовым числом стохастически варьировала в пределах от 1 до 3 сек. Каждый испытуемый в один опытный день выполнял 6 блоков тестирования, в каждом из которых

предъявлялось 80 циклов "список-тест", составленных из случайным образом подобранных чисел. Тестирование предусматривало возможность включения одного из трех вариантов обратной связи (ОС), сигнализирующей о результате обработки испытуемым очередного цикла появлением на экране зеленой, желтой и красной полос в соответствии с типом ответа: правильная реакция, пропуск сигнала или ложная реакция на число, не присутствовавшее в списке эталонов.

Для выполнения экспериментальной работы совместно с фирмой "Костип" (Россия) был разработан портативный прибор "Варипульс" для оперативной регистрации и вычисления индексов вариационной пульсометрии. Помимо исследовательских целей прибор "Варипульс" предназначен согласно рекомендации Минздрава РФ для донозологического контроля кризисных состояний здоровья, вызываемых стрессорным перенапряжением сердечно-сосудистой системы.

С помощью прибора "Варипульс", имеющего выход на компьютер по последовательному порту, у испытуемых прерывно регистрировались и записывались на жесткий диск компьютера значения последовательных МСИ. Для каждого блока тестирования длительностью 7-8 мин автоматически подсчитывались показатели результативности тестовой деятельности (число правильных и ложных реакций, среднее латентное время реакций) и показатели ВП. Одним из таких показателей был выбран широко используемый и имеющий хорошую нормативную базу индекс напряжения по Баевскому [2]:

$$ИН = A_{mo} / \{2M_o(\Delta MСИ)\},$$

где A_{mo} - амплитуда моды распределения МСИ, M_o - мода распределения, $\Delta MСИ$ - размах МСИ.

В дополнение к индексу Баевского автором были разработаны два новых индекса для оценивания вариативности ритма сердца:

1) индекс симпато-адреналового тонуса

$$САТ = (A_{mo} \times 0.1) / (СКОП / M_o),$$

где $СКОП = 1/2$ от величины среднеквадратического отклонения между *последовательными* МСИ;

2) индекс медленноволновой аритмии

$$МА = [(1 - СКОП/СИГМА) * 100] - К,$$

где *СИГМА* - среднеквадратическое отклонение для ряда МСИ относительно среднего значения, а *К* - константа, равная 30. Для этого значения *К* величина индекса МА приближается к нулю для ряда нормально распределенных случайных МСИ.

Индекс САТ имеет ту же логическую основу, что и индекс напряжения Баевского, но в отличие от последнего оценивает только быстрый компонент вариативности МСИ, так как содержит в знаменателе оценку не суммарного размаха МСИ, а нормированное среднеквадратическое отклонение (коэффициент вариации) только между *последовательными* МСИ. Естественным дополнением индекса САТ является индекс МА - оценка дисперсии МСИ, оставшейся за вычетом ее быстрого компонента, т.е. содержащей все более медленные ритмики МСИ, чем наблюдаемые между соседними МСИ. В контексте настоящего исследования подобное формальное разделение суммарной дисперсии МСИ на быстрый и медленный компоненты преследует сугубо прагматическую цель: оценить вклад каждой из компонент в суммарную вариативность МСИ при некоторых режимах операторской деятельности.

Индексы ВП рассчитывались на интервалах оценивания длительностью не менее 7 мин (длительность однократного блока тестирования), что соответствует международным стандартам для анализа краткосрочной вариативности МСИ [6].

Общее время тестирования испытуемых составляло 45-50 мин. Каждый испытуемый участвовал в трех опытных сессиях, с включением одного из трех вариантов ОС в четных блоках тестирования. Нечетные блоки тестирования оставались без ОС во все опытные дни. По результатам тестирования оценки индексов ВП на фоне включенной ОС нормировались относительно соответствующих оценок при отсутствии ОС для каждого испытуемого отдельно. Затем полученные нормированные данные усреднялись в пределах каждой возрастной группы. Статистическая значимость различия средних для условий наличия и отсутствия ОС проверялась по критерию Стьюдента.

В обследовании приняли участие две группы испытуемых из числа студентов и сотрудников МГУ. По результатам тестирования для анализа были отобраны данные 32-х человек в возрасте от 19 до 26 лет ($M=22\pm 3$) и 17-ти

человек в возрасте от 31 до 49 лет ($M=39\pm 4$). Критерием отбора была устойчивая результативность работы испытуемого при тестировании на уровне не менее 85% правильных реакций, выполненных со средним латентным периодом менее 600 мс, и не более 20% ложных реакций. На этом высоком уровне выполнения операторской задачи практически не прослеживалась связь между показателями результативности и наличием или отсутствием любого из вариантов ОС.

Средние значения индексов ВП, полученные для этих групп испытуемых до начала тестирования приведены в табл 1.

Таблица 1.

Средние индексы вариационной пульсометрии и частота сердечных сокращений у испытуемых двух возрастных групп в фоне непосредственно до выполнения тестовой задачи по данным регистрации 200 МСИ.

Индекс ВП	Группа 1 19-26 лет	Группа 2 31-49 лет	Δ %	p
ИН	34.1 \pm 2.3	47.6 \pm 2.9	+ 40	< 0.05
САТ	210.4 \pm 21.2	480.3 \pm 46.6	+ 128	< 0.001
МА	22.9 \pm 1.8	32 \pm 2.6	+ 40	---
ЧСС	64 \pm 2.6	74 \pm 4.1	+ 15	---

Обозначения: со знаком "±" даны оценки ошибки средней; Δ % - изменение соответствующего индекса в процентах при переходе от младшей к старшей возрастной группе; p - уровень статистической значимости величины Δ % по критерию Стьюдента.

Как видно, с возрастом индексы вариационной пульсометрии существенно увеличиваются. Причем в наибольшей степени это относится к индексу САТ, который в старшей возрастной группе увеличен на 128% ($p < 0.001$). Поэтому результаты дальнейшего тестирования даны для каждой возрастной группы отдельно. Показатель ЧСС также несколько увеличивался в старшей возрастной группе, но эта тенденция не достигала статистически значимого уровня. В пределах каждой из возрастных групп показатель ЧСС практически не менялся в зависимости от различных вариантов тестирования. В тоже время показатели ВП существенным образом зависели от наличия ОС во время тестирования.

На рис.1 представлены оценки индексов ВП для обеих возрастных групп на фоне тестирования с наличием или отсутствием трех типов ОС. В младшей

возрастной группе включение ОС по признаку выполнения правильной реакции или пропуска реакции не сказывались на индексах ВП. Однако, при тестировании на фоне включенной ОС по параметру ложных реакций индексы ИН и САТ резко увеличивались, в среднем соответственно на 23 и 64% относительно их значений при работе без ОС (рис.1).

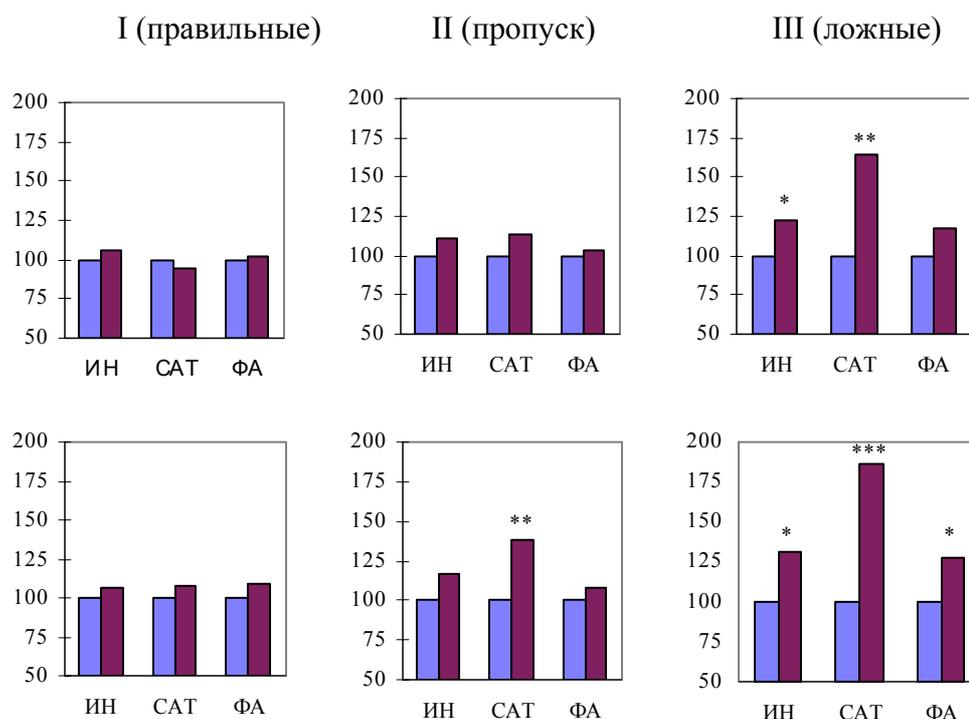


Рисунок 1.

Средние значения индексов вариационной пульсометрии у испытуемых двух возрастных групп на фоне операторской деятельности при разных типах обратной связи по результатам этой деятельности: по показателям правильных реакций (I), пропусков сигнала (II) и ложных реакций (III). Данные для младшей и старшей возрастных групп приведены на диаграммах в верхней и нижней части рисунка соответственно.

По вертикальной оси отложены изменения соответствующих индексов ВП на фоне включенной обратной связи (темные столбцы) в процентах от аналогичных индексов на фоне без обратной связи: принятых за 100 % (светлые столбцы). По горизонтали – индексы вариационной пульсометрии (ФА идентично МА). Статистическая значимость различий отмечена символами: * - $p < 0.05$; ** - $p < 0.01$; *** - $p < 0.001$.

В старшей возрастной группе при тестировании ОС по правильным реакциям также не отмечалось значимых изменений индексов ВП. Однако уже при включении ОС по пропускам реакций наблюдалась явная тенденция к увеличению индекса ИН и статистически значимое повышение на 38% индекса САТ (рис.1). При переходе к работе с ОС по признаку ложных реакций оба указанных индекса резко возрастали, достигая статистически значимых величин соответственно в 131 ($p < 0.05$) и 186% ($p < 0.001$) относительно условий

тестирования без обратной связи. Одновременно статистически значимо увеличивался на 28% ($p < 0.05$) и индекс МА.

Обсуждая полученные результаты следует иметь ввиду, что использованные для организации ОС показатели результативности операторской работы различались по своей оценочно-эмоциональной модальности: количество правильных реакций и число пропусков сигнала, составляя в сумме заданную регламентом тестирования постоянную величину, по сути характеризовали одну и ту же сторону тестовой деятельности - обработку целевого сигнала. Только первые имели эмоционально-позитивный, а вторые - эмоционально-негативный оттенок, поскольку одна и та же деятельность отслеживалась по количеству удачных или неудачных решений соответственно. Показатель ложных реакций характеризовал совсем другой - качественный аспект тестовой деятельности, но при экспонировании испытуемому, очевидно, тоже являлся эмоционально-негативной оценкой.

Полученные данные свидетельствуют, прежде всего, о том, что объективизация результата деятельности по показателю ее "успешности" (правильные реакции) практически не меняет интенсивность вегетативного сопровождения этой деятельности, выраженную в индексах ВП. В тоже время демонстрация испытуемому той же стороны его деятельности, но по шкале "неуспешности" (пропуски сигнала) приводило к нарастанию индексов ИП и САТ, что особенно заметно в старшей возрастной группе. Наибольший рост индексов ВП наблюдался в обеих возрастных группах при объективизации показателя "ложные реакции".

Таким образом, экспонирование испытуемым эмоционально-негативных оценок результативности их тестовой деятельности приводит к увеличению индексов стабилизации ритма сердца, особенно выраженному в старшей возрастной группе.

При этом наиболее чувствительной характеристикой ВП оказался индекс САТ. Поскольку этот индекс в наибольшей степени отражает быстрые компоненты вариативности МСИ, его увеличение свидетельствует о стабилизации ритма сердца именно в ряду последовательных МСИ. Медленные компоненты вариативности МСИ, отражающиеся главным образом в индексе МА, как видно, либо вовсе не "откликаются" на включение эмоционально-негативной ОС, либо несколько увеличиваются в старшей возрастной группе

(рис.1). Можно полагать, что увеличение индекса САТ при объективизации эмоционально-негативных показателей деятельности свидетельствует о преимущественном снижении на этом фоне суммарной энергии быстрых регуляторных контуров. В терминах симпато-парасимпатического баланса это означает уменьшение вклада парасимпатической регуляции [1,8] в процессах вегетативного обеспечения психической деятельности.

Индекс МА в гораздо меньшей степени зависел от наличия эмоционально-негативной ОС: статистически-значимые сдвиги этого показателя были отмечены только в старшей возрастной группе (Рис.1) и свидетельствовали об увеличении вклада медленно-волновой ритмики в суммарную дисперсию МСИ.

Насколько, однако, потогномоничны сдвиги физиологических регуляций в сторону большей стабилизации ритма сердца? Исследования последних лет дают однозначный ответ на этот вопрос: чем дольше периоды сверхнормативной стабилизации ритма сердца, особенно по компоненте быстрой вариативности МСИ, тем более вероятно возникновение кризисных явлений в системах физиологических регуляций, например в самой сердечно-сосудистой системе [5,6 и др]. По-видимому, симптоматичен в этом отношении и более чем двукратный рост индекса САТ ($p < 0.001$) при увеличении среднего возраста испытуемых на 17 лет (Табл.1). Подобные сдвиги вариативности МСИ в сторону большей стабилизации ритма сердца с возрастом отмечены и другими исследователями [10].

Таким образом, функциональное состояние человека-оператора может эволюционировать в неблагоприятном направлении при эмоционально-негативном типе информирования об объективных результатах его деятельности. В реальных комплексах "человек-машина" характер эмоциогенного влияния информационных потоков далеко не всегда очевиден. Поэтому при отработке способов объективизации контрольно-измерительных параметров в биотехнических системах применение методов вариационной пульсометрии может позволить оптимизировать выбор вариантов обратных связей по результатам управления, чтобы минимизировать их возможное неблагоприятное влияние на функциональное состояние человека-оператора.

Список литературы:

- 1.Баевский Р.М. Прогнозирование состояний на грани нормы и патологии.М.: Медицина, 1979. 294 с.
- 2.Баевский Р.М., Кириллов О.И., Клецкин С.З. Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе. М.: Наука, 1984. 221 с.
- 3.Карпенко А.В. Использование статистических характеристик сердечного ритма для оценки умственной работоспособности // Физиология человека. 1986. Т.12 N3. С. 426-431.
- 4.Симонов П.В., Фролов М.В. Эмоциональное напряжение оператора и его влияние на эффективность деятельности // Диагностики и прогнозирование функционального состояния мозга человека. М.: Наука.1988. С.174-206.
- 5.Kaplan D.T. The analysis of variability // J Cardiovasc Electrophysiol 1994. V. 5. P. 16-19.
- 6.Malik M. Heart rate variability: Standarts of measurement, physiological interpretation and clinical use // Europ. Heart J. 1996. V. 17. 354-381
- 7.Pagani M., Mazzuero G., Ferrari A. et al. Sympathovagal interaction during mental stress // Circulation. 1991 V. 83. (Suppl 2). P. 43-53.
- 8.Sayers B.McA. Analysis of heart rate variability // Ergonomics. 1973. V.16. No.1. P. 17-32.
- 9.Sternberg S. Memory-scanning: mental processes revealed by reaction-time experiments // American Scientist. 1969. V.57. No.4. P.421 - 457.
- 10.Tsuji H., Venditi F.J., Manders E.S., et al. Reduced heart rate variability and mortality risk in an elderly cohort: The Framingham Heart Study //Circulation. 1994. V. 90. P. 878-883.

Московский государственный университет, биологический факультет, кафедра физиологии человека и животных. E-mail: kapl@human.bio.msu.su

Kaplan A.Y.

Short-term variability of Heart Rate and Type of the Feedback for Results of Operator Like Activity in Humans

Moscow State University, Biological Faculty, Department of Human Physiology

In the memory task required sustained attention, human positive and negative emotional state was varied by different types of feedback for results of the performance in terms of success or failure: Standard and original indices was used for evaluation of the short-term variability of heart rate (HRV) during performance. It was shown that changes of HRV accompanied just periods of the performance with failure type of the feedback. These changes reflected the stabilization of heart bit-to-bit intervals. Most sensitive parameter for testing of such HRV changes was original index of fast HRV. Such kind of autonomic reactions in humans during operator-like activity well known as a predictor for unsatisfied functional state. This confirm the practical importance of an application of HRV indices for testing of the ergonomic properties of the "man-machine" control system.

Вариабельность ритма сердца и характер обратной связи по результату операторской деятельности у человека

Каплан А.Я.

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова

В операторской задаче на запоминание, требующей напряженного внимания, положительное и отрицательное эмоциональные состояния испытуемых создавалось путем введения двух типов обратной связи: по числу "удачных" или "неудачных" решений. Для оценки вариабельности ритма сердца (ВРС) испытуемых в ходе тестирования вычислялись стандартные и оригинальные индексы. Было показано, что изменения индексов ВРС наблюдались только на фоне обратной связи по числу "неудачных" решений. Эти изменения свидетельствовали о стабилизации межсистолических интервалов. Наиболее чувствительной оценкой для тестирования этих изменений оказался новый индекс быстрой вариативности ритма сердца.

Отмеченные изменения ВРС обычно наблюдаются у человека-оператора при развитии неблагоприятных функциональных состояний. Поэтому представляется целесообразным использовать оценку ВРС у человека-оператора для тестирования эргономических свойств систем "человек-машина".