

ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЕГЕТАТИВНОЙ РЕАКТИВНОСТИ КАК ПРОГНОСТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ КРИТИЧЕСКОГО УРОВНЯ УТОМЛЕНИЯ У ОПЕРАТОРОВ

А.Е. Бубнова, А.Е. Науменко, С.В. Клаучек

*ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный медицинский университет»
Министерства здравоохранения Российской Федерации, кафедра нормальной физиологии*

Профессиональная деятельность операторов характеризуется условиями повышенной сложности и связана с постоянным воздействием стрессовых факторов, что способствует развитию переутомления. Одним из проявлений устойчивого утомления является вегетативная дисфункция. Материалы и методы: 250 здоровых мужчин в возрасте 18–25 лет были обучены навыкам операторской деятельности с использованием программы «Smile». После установления стабильного результата проведено исследование эффективности непрерывного сенсомоторного слежения в усложненных условиях деятельности в течение 60 минут. Спектральные характеристики вариабельности сердечного ритма регистрировались в каждый из трех периодов стрессовой пробы «падение с колен». Результаты: по субъективным и объективным показателям психического утомления были выделены две группы по 50 человек с наличием и отсутствием критического уровня утомления. При проведении стрессовой пробы в каждом ее периоде были выявлены статистически значимые отличия спектральных показателей сердечного ритма между группами. Заключение: выявлены вегетативные критерии, сопутствующие развитию критического уровня утомления у операторов при моделировании сенсомоторной деятельности, обнаружены взаимосвязи ее результативности с типом вегетативной реактивности на фоне стрессовой нагрузки.

Ключевые слова: операторский состав, критический уровень утомления, моделируемая операторская деятельность, спектральный анализ вариабельности сердечного ритма, стрессовая нагрузка.

DOI 10.19163/1994-9480-2019-4(72)-60-64

PHYSIOLOGICAL FEATURES OF AUTONOMIC REACTIVITY AS A PREDICTING CRITERION FOR THE CRITICAL OPERATOR FATIGUE

A.E. Bubnova, A.E. Naumenko, S.V. Klauhek

*FSBEI HE «Volograd State Medical University» of Public Health Ministry of the Russian Federation,
Department of normal physiology*

Professional operator practice is characterized by conditions of increased complexity and is associated with the constant action of stressors, which contributes to the development of fatigue. One of the manifestations of sustained fatigue is autonomic dysfunction. Methods. 250 healthy men aged 18–25 years were trained in operator skills using the test «Smile». After establishing a stable result a study was conducted of the effectiveness of sensorimotor tracking in complicated conditions for 60 minutes. Heart rate variability was recorded during all three periods of the stress test «fall from the knees». Results. Operators were divided into two groups due to the presence of fatigue. The frequency parameters were significant at all periods of stress test. Conclusion. The criteria for the critical operator fatigue were revealed as a result of sensorimotor tracking. Autonomic reactivity during stress test was associated with performance in activity modeling.

Key words: operator staff, critical level of fatigue, operator activity modeling, spectral analysis of heart rate variability, stress test.

Сложность труда современного оператора может быть обусловлена продолжительностью рабочей смены, превышающей регламент; повышенной напряженностью и необходимостью длительного сосредоточения на объекте управления; вероятностью развития ситуаций, требующих немедленного разрешения; высокой степенью стресса ответственности [1]. В связи с этим у операторского персонала развивается устойчивое утомление, которое относится к состоянию дезадаптации и усугубляется продолжающимся действием неблагоприятных факторов, что, в конечном итоге, препятствует стабильности функциональных систем, обеспечивающих эффективное выполнение деятельности [3]. Именно текущее функциональное состояние оператора определяет уровень его

работоспособности. При этом важным прогностическим критерием успешности деятельности является критический уровень утомления, при котором резко возрастает риск фатальных ошибок, обусловленных человеческим фактором [5].

Ряд исследований показал, что обязательным проявлением таких нарушений функционального состояния и дезадаптации у здоровых лиц является вегетативный дисбаланс, проявляющийся высоким напряжением вагоинсулярного и симпатoadrenalового компонентов регуляторных систем, что может явиться предпосылкой к развитию профессионально обусловленных заболеваний кардиореспираторной системы [2]. В качестве индикатора адаптационных возможностей организма выступает динамика вариабельности сердечного ритма [7].

Ее исследование с использованием спектрального анализа является доступным неинвазивным, удобным в применении методом оценки функционального состояния (активности) вегетативной нервной системы, который может использоваться в условиях физических и психических нагрузок [8].

Более информативным, чем статичные показатели вегетативного тонуса в оценке уровня адаптации и эмоциональной устойчивости, является анализ вегетативной реактивности. Ее повышение обычно сопровождается напряженную операторскую деятельность и обеспечивает ее успешное выполнение. В связи с этим актуальным является использование эмоциогенных нагрузок при определении данных показателей саморегуляции. Такие стрессовые пробы способны выявить ключевые нейрофизиологические признаки уязвимости сердечно-сосудистой системы и функционального состояния организма оператора в целом, которые не проявляются в покое [6].

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Выявление вегетативных критериев предрасположенности к развитию критического уровня утомления операторов при моделировании сенсомоторной деятельности и установление ее взаимосвязи с типом физиологической реакции сердечного ритма на стандартную эмоциогенную нагрузку.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В обследовании приняли участие 250 молодых здоровых мужчин в возрасте 18–25 лет, не имеющих хронических заболеваний и не подвергавшихся накануне интенсивным физическим нагрузкам.

Степень утомления обследуемых по данным субъективной оценки изучалась с использованием опросника «FAS» [9]. Объективно уровень операторской работоспособности и степень ее снижения на фоне развивающегося утомления оценивались на модели сенсомоторной операторской деятельности с использованием компьютерной программы «Smile» [1]. Для выработки устойчивого навыка операторской деятельности предварительно обследуемые осуществляли слежение в течение трех периодов. Повышение сложности поставленной задачи в каждом последующем периоде обеспечивалось увеличением скорости и случайности движения объекта слежения. Каждый обследуемый должен был максимально быстро и точно сопоставить (совместить) курсор манипулятора с движущимся объектом на экране монитора. Программой рассчитывались средние значения текущего параметра слежения для каждого периода и всего тестирования в целом. Тренировка операторских функций проводилась пятикратно по 9 минут. Затем, после часового перерыва проводилось повторное обучение. После двухдневного перерыва обследуемые выполняли те же задания для закрепления навыка.

После установления стабильного результата для оценки степени утомления было проведено обследование эффективности операторской деятельности в осложненных условиях. Общее время слежения за объектом составило 60 минут, каждый режим соответственно продолжался по 20 минут.

Для оценки вегетативной реактивности была использована эмоциогенная проба «падение с колен» К.К. Платонова, которая была впервые предложена для профессионального отбора летного контингента реактивной авиации. Данная стрессовая нагрузка позволяет выявить индивидуальные особенности реакции на фоне пассивно-оборонительного рефлекса и демонстрирует высокую надежность, информативность и воспроизводимость [4]. При выполнении пробы «падение с колен» обследуемые придерживались следующего алгоритма: положение обследуемого – стоя на коленях перед мягкой поверхностью; исключая опору на руки, обследуемый совершает падение лицом вниз с небольшим поворотом головы в сторону для обеспечения безопасности. Во время проведения пробы визуально оценивались вегетативные реакции, такие, как побледнение или гиперемия лица, влажность кожи и другие. Были выделены три этапа тестирования, в течение которых регистрировалась вариабельность сердечного ритма: исходное положение в покое (лежа), предстарт – стоя на коленях и непосредственно после падения (лежа).

Вариабельность сердечного ритма измерялась с помощью комплекса «Поли-Спектр» (ООО «Нейрософт», Россия) и анализировалась в соответствии с Руководством Целевой группы Европейского общества кардиологов и Североамериканского общества кардиостимуляции и электрофизиологии [11]. Спектральный анализ позволяет выявить вклад каждого частотного диапазона, как показателя соответствующего регуляторного механизма, в общую мощность колебаний. Оценивались общая мощность спектра (Total Power – TP, mc^2), которая равна сумме спектральных мощностей в высокочастотном, низкочастотном и очень низкочастотном диапазонах; высокочастотного компонента в диапазоне 0,15–0,40 Гц (High Frequency – HF, mc^2), отражающего активность парасимпатического отдела ВНС, низкочастотного компонента в диапазоне 0,04–0,15 Гц (Low Frequency – LF, mc^2), считающегося преимущественно характеристикой степени симпатических влияний [10]. Также оценивался очень низкочастотный диапазон в диапазоне частот 0,003–0,04 Гц (Very Low Frequency – VLF, mc^2), который показывает степень активации церебральных эрготропных структур. Компоненты спектра LF и HF определялись также в нормализованных единицах (LF н.е. и HF н.е.), выражающих свой относительный вклад в пропорции к общей мощности за вычетом очень низкочастотных волн (VLF). Анализировалось отношение LF/HF как показатель взаимосвязи симпатической и парасимпатической активности

Таблица 1

Изменения структуры и качества операторской деятельности в группах операторов с наличием и отсутствием критического уровня утомления ($M \pm m$)

Группа обследуемых	Отсутствие критического уровня утомления ($n = 50$)			Наличие критического уровня утомления ($n = 50$)		
	1-й	2-й	3-й	1-й	2-й	3-й
Режимы слежения						
Частота эпизодов отсутствия деятельности	1–3	4–6	7–9	1–3	5–7	9–12
Длительность эпизода отсутствия деятельности, с	3,1 ± 0,8	5,4 ± 1,9	7,2 ± 1,2	9,8 ± 1,3*	18,6 ± 2,8*	26,4 ± 5,3*
Критическое замедление деятельности, усл. ед.	7,3 ± 0,81	8,6 ± 0,59	12,05 ± 0,95	7,8 ± 0,60	13,04 ± 0,97*	17,9 ± 0,44*

* Различия между группами в пределах сходного режима слежения статистически достоверны ($p < 0,05$).

(вегетативного баланса). Структура спектральной мощности оценивалась по процентному вкладу HF%, LF%, VLF% волн. Длительность регистрации записей для каждого этапа составила 5 минут (short-term), исследование проводилось в первой половине дня (9.00-11.00), в условиях лаборатории.

Исследования проводились согласно биоэтическим нормам. Данные обрабатывались методами параметрической статистики с использованием t-критерия Стьюдента. Различия считались достоверными при уровне значимости не ниже 95 % ($p < 0,05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первоначальном этапе исследования проводилась субъективная и объективная оценка уровня утомления у операторов. Согласно данным опросника «FAS» оценка лиц, с отсутствием признаков утомления (62 % опрошенных) составила в среднем ($16,9 \pm 2,40$) балла. В группе операторов, характеризовавшихся наличием утомления, в которую вошли 38 % обследованных, она составила в среднем ($28,0 \pm 3,19$) баллов ($p < 0,05$). На завершающем этапе обучения выполнению операторской работы у 250 обследуемых были получены значения величины ошибки-рассогласования, сформированные в результате комплексной оценки дистанции отклонения от движущегося объекта с одновременным учетом времени реакции и случайности направления движения. Допустимыми при эффективной деятельности оказались: для 1-го режима среднее значение ошибки – ($7,8 \pm 0,65$), для 2-го режима – ($10,9 \pm 0,57$) и для 3-го режима ($15,0 \pm 0,94$) условных единиц соответственно. Объективными критериями критического уровня утомления при данной сенсомоторной нагрузке явилось значительное замедление темпа слежения, которое соответствует увеличению ошибки-рассогласования и снижению скорости и точности реакции, либо появление эпизодов полного отсутствия деятельности. При этом и частота и длительность прекращения слежения отражали процессы торможения восприятия объекта и моторного компонента реакции на фоне развивающегося утомления.

Оценка структуры сенсомоторных реакций в каждый момент рабочего времени показала, что у всех обследуемых наблюдалось как нарушение, так и последующее восстановление деятельности, причем частота и длительность таких отклонений в структуре операторской работы нарастали по мере усложнения выполняемых заданий. В каждом последующем периоде деятельности было выявлено увеличение ошибки-рассогласования, а также частоты и длительности перерывов в слежении. По результатам субъективной и объективной оценки были выделены две группы по 50 операторов, отнесенных к лицам с «наличием критического уровня утомления» и «отсутствием критического уровня утомления». Результаты представлены в табл. 1.

Анализ показателей у обследованных операторов выявил, что частота эпизодов отсутствия деятельности в обеих группах отличалась незначительно, что может говорить об общих признаках утомления. При этом разница длительности эпизодов отсутствия деятельности в группе с наличием критического уровня утомления была статистически значимой во всех режимах сенсомоторного слежения. Также были обнаружены достоверные различия по показателю «критическое замедление деятельности» по мере увеличения скорости и случайности предъявления сигнала. Так, в группе операторов с наличием утомления степень нарушения деятельности являлась критической во втором и третьем периодах ($p < 0,05$), а в группе операторов с отсутствием утомления ошибка-рассогласование не превышала допустимую величину (полученную на завершающем этапе тренировок) во всех трех периодах деятельности. Таким образом, операторы с наличием утомления по показателям сенсомоторного слежения демонстрировали более низкие результаты в режимах, отличающихся повышенной сложностью с эпизодами фатального изменения структуры деятельности. Операторы с отсутствием утомления показали высокие результаты как при выполнении более простого задания, так и по мере его усложнения в течение непрерывной деятельности.

На следующем этапе проводился анализ вариабельности сердечного ритма у представителей групп с «наличием критического уровня утомления» и «отсутствием критического уровня утомления». Наиболее демонстративные параметры спектрального анализа представлены в табл. 2. Как следует из полученных данных, спектральные

характеристики ритма при регистрации в состоянии покоя в выделенных группах практически не отличались. В связи с этим, не представлялось возможным ответить, какой тип преимущественного вегетативного тонуса (ваго-, симпатико- или нормотонический) соответствует предрасположенности к развитию критического уровня утомления.

Таблица 2

Спектральные характеристики вариабельности сердечного ритма у операторов с наличием и отсутствием «критического уровня утомления» при проведении эмоциогенной пробы ($M \pm m$)

Показатели	Отсутствие критического уровня утомления $n = 50$			Наличие критического уровня утомления $n = 50$		
	«покой»	«пред-старт»	«падение»	«покой»	«пред-старт»	«падение»
TP мс ²	3156,1 ± 272,3	2591,4 ± 214,6	3912,8 ± 292,2	2603,2 ± 223,4	1830,5 ± 192,2*	3205,4 ± 268,1
LF н.е.	41,90 ± 3,03	55,50 ± 4,13	44,70 ± 3,14	51,80 ± 3,91*	67,40 ± 4,26*	59,8 ± 4,05*
HF н.е.	58,10 ± 4,01	44,50 ± 4,05	55,20 ± 4,08	48,30 ± 3,12*	32,60 ± 2,81*	40,3 ± 3,01*
LF/HF	0,72 ± 0,05	1,24 ± 0,11	0,81 ± 0,07	1,07 ± 0,11*	2,06 ± 0,18*	1,49 ± 0,15*
% VLF	27,0 ± 2,2	32,1 ± 2,4	29,1 ± 2,1	32,2 ± 2,6	44,2 ± 3,1*	38,3 ± 2,7*
% LF	30,6 ± 2,6	37,7 ± 2,8	31,8 ± 2,4	35,2 ± 2,9	37,8 ± 2,6	36,7 ± 2,6
% HF	42,4 ± 3,1	30,2 ± 2,1	39,2 ± 3,0	32,8 ± 2,8*	18,1 ± 0,8*	24,9 ± 1,7*

* Различия между группами в пределах сходного этапа пробы статистически достоверны ($p < 0,05$).

Как следует из полученных данных, в обеих группах обследуемых наблюдались изменения спектральных показателей вариабельности сердечного ритма при воздействии моделируемого стрессового фактора – снижение уровня общей мощности спектра (TP) и высокочастотного компонента (HF) и повышение значений низкочастотных компонентов (LF, VLF), а также после нагрузки – повышение вклада общей мощности (TP) и высокочастотного компонента (HF). Данная динамика указывает на относительно удовлетворительную адаптацию при психоэмоциональном напряжении у операторов с отсутствием предрасположенности к утомлению. В течение всех трех этапов тестирования в группе лиц с наличием критического уровня утомления отмечался достоверно более низкий уровень высокочастотного компонента (HF) в абсолютных значениях и процентном отношении; наблюдались статистически значимые различия высокочастотного и низкочастотного компонентов ВСР, выраженных в нормализованных единицах, а также значения соотношения низкочастотного компонента спектра к высокочастотному (LF/HF)

($p < 0,05$). Таким образом, для лиц с критическим уровнем утомления характерно снижение парасимпатических влияний на сердечный ритм и повышенная активация симпатико-адреналовой системы.

В предстартовом состоянии в группе с критическим уровнем утомления отмечалось достоверное снижение уровня общей мощности спектра, что может указывать на общее снижение функционального состояния. Следует отметить, что в периоде «предстарт» достоверные отличия значений низкочастотных волн (LF) в абсолютных единицах связаны с существенной достоверной разницей уровня общей мощности (TP), что прослеживается при анализе структуры мощности и процентного вклада низкочастотного (LF%) компонента ($p > 0,05$). При оценке структуры мощности в группе с критическим уровнем утомления в периодах «предстарт» и «падение» также отмечается статистически значимое увеличение вклада очень низкочастотных волн (VLF%) в общую мощность спектра, что может указывать на повышенную активность центральных эрготропных и гуморальных механизмов регуляции ритма сердца. Таким образом, более низкие значения общей мощности спектра и высокочастотного компонента наряду с повышением очень низкочастотного компонента на фоне моделируемой стрессовой нагрузки отражают у них общее понижение адаптационных возможностей организма и напряжение регуляторных механизмов, что при высоком потреблении операторами своих ресурсов может привести к дезадаптации в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для прогноза эффективности профессиональной деятельности операторов необходимо выявление пороговых значений показателей, за пределами которых следует существенное (значимое) нарушение качества ее выполнения. При развитии критического уровня утомления определяются снижение скорости и точности реагирования на движение объекта до критической величины, а также спонтанные перерывы в деятельности. Вариабельность сердечного ритма является чувствительным методом, отражающим особенности вегетативной регуляции в условиях моделируемого стресса, при использовании которого следует принимать во внимание как исследование динамики симпатико-адреналовой активности (LF н.е., HF н.е.) и показателя вагосимпатического баланса (LF/HF), так и оценку всех частотных составляющих спектра в целом. Проба «падение с колен» с непрерывной регистрацией вариабельности сердечного ритма и его последующим спектральным анализом может выступать в качестве предиктора состояния утомления, достигающего критического уровня, в целях своевременной коррекции и изменения режима работы, что позволяет предотвратить возникновение аварийных ситуаций и развитие дезадаптации у представителей операторского состава.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клаучек С.В. Физиологические основы эффективности операторской деятельности и ее биорезонансная коррекция / С.В. Клаучек, Р.А. Кудрин, Т.Н. Кочегура, С.А. Шмидт, Р.Е. Ахундова, А.С. Фокина. – Волгоград: Изд-во Волгоград, 2009. – 218 с.
2. Матвеева В.В. Определение вегетативной дисфункции с позиций доказательной медицины / В.В. Матвеева, А.Г. Суслов, А.Г. Полякова // Журнал МедиАль. – 2013. – Том 7, № 2. – С. 22–25.
3. Петухов И.В. Зрительное утомление человека-оператора в процессе восприятия информации с электронных дисплеев / И.В. Петухов, Д.Н. Чаусов, В.В. Беляев, П.А. Курасов, И.О. Танрывердиев // Вестник МГОУ: Серия «Физика-Математика». – 2014. – № 2. – С. 87–94.
4. Платонов К.К. Человек в полете / К.К. Платонов. – М.: Воениздат, 1957. – 288 с.
5. Пучкова А.Н. Экспериментальная модель исследования умственного утомления и адаптивной функции дневного сна для восстановления работоспособности / А.Н. Пучкова, О.Н. Ткаченко, В.Б. Дорохов // Экспериментальная психология. – 2013. – Т. 6, № 2. – С. 48–60.
6. Aylward J. Towards an emotional «stress test»: a reliable, non-subjective cognitive measure of anxious responding / J. Aylward, O. J. Robinson // Scientific reports. – 2017. – № 7. doi:10.1038/srep40094.
7. Hoang Chu Duc. A review of heart rate variability and its applications / Hoang Chu Duc, Kien Nguyen Phan, Dung Nguyen Viet // APCBEE Procedia. – 2013. – Vol. 7. – P. 80–85.
8. Kim H.G. Stress and heart rate variability: a meta-analysis and review of the literature / H.G. Kim, E.J. Cheon, D.S. Bai, Y.H. Lee, B.H. Koo // Psychiatry investigation. – 2017. – Vol. 15, № 3. – P. 235–245.
9. Michielsen H.J. Psychometric qualities of a brief self-rated fatigue measure: the fatigue assessment scale / H.J. Michielsen, J.D. Vries, G.L. Van Heck // J. Psychosom. Res. – 2003. – Vol. 54, № 4. – P. 345–352.
10. Singh N. Heart rate variability: an old metric with new meaning in the era of using health technologies for health and exercise training guidance. Part one: physiology and methods / N. Singh, K.J. Moneghetti, J.W. Christle, D. Hadley, D. Plews, V. Froelicher // Arrhythmia and electrophysiology review. – 2018. – Vol. 7, № 3. – P. 193–198.
11. Task Force. Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Task force of the European society of cardiology and the north American society of pacing and electrophysiology // European Heart J. – 1996. – № 17. – P. 354–381.

REFERENCES

1. Klauchek S.V. Fisiologicheskie osnovy effektivnosti operatorskoy deyatel'nosti i ee biorezonansnaya korrekciya [Physiological basis of the efficiency of operator activity and its bioresonance correction]. Volgograd: Izd-vo Volgograd, 2009. 218 p.
2. Matveeva V.V. Opredelenie vegetativnoj disfunkcii s pozicij dokazatel'noj mediciny [Determination of autonomic dysfunction from the perspective of Evidence-Based Medicine]. Jurnal MediAl [MediaAl Magazine], 2013, no. 2 (7), pp. 22–25.
3. Petukhov I. Zritel'noe utomlenie cheloveka-operatora v processe vospriyatiya informacii s elektronnyh displeev [Visual fatigue of the human operator in the perception information from electronic displays]. Vestnik MGOU: Ser. «Fisika-Matematika» [Bulletin MGOU: Series «Physics-Mathematics»], 2014, no. 2, pp. 87–94.
4. Platonov K.K. Chelovek v polete [Man in flight]. Moscow: Voenizdat, 1957. 288 p.
5. Puchkova A.N. Eksperimental'naya model issledovaniya umstvennogo utomleniya i adaptivnoy funkcii dnevno snia dlya vosstanovleniya rabotosposobnosti [An experimental model for research of mental fatigue and adaptive function of daytime sleep to restore performance]. Eksperimental'naya psihologiya [Experimental psychology], 2013, no. 2 (6), pp. 48–60.
6. Aylward J. Towards an emotional «stress test»: a reliable, non-subjective cognitive measure of anxious responding. Scientific reports, 2017, no. 7. doi: 10.1038/srep40094.
7. Hoang Chu Duc. A review of heart rate variability and its applications. APCBEE Procedia, 2013, vol. 7, pp. 80–85.
8. Kim H.G. Stress and heart rate variability: a meta-analysis and review of the literature. Psychiatry investigation, 2017, vol. 15, no. 3, pp. 235–245.
9. Michielsen H.J. Psychometric qualities of a brief self-rated fatigue measure: the fatigue assessment scale. J. Psychosom. Res., 2003, vol. 54, no. 4, pp. 345–352.
10. Singh N. Heart rate variability: an old metric with new meaning in the era of using health technologies for health and exercise training guidance. Part one: physiology and methods. Arrhythmia and electrophysiology review, 2018, vol. 7, no. 3, pp. 193–198.
11. Task Force. Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Task force of the European society of cardiology and the north American society of pacing and electrophysiology. European Heart J., 1996, no. 17, pp. 354–381.

Контактная информация

Клаучек Сергей Всеволодович – д. м. н., профессор, зав. кафедрой нормальной физиологии, Волгоградский государственный медицинский университет, e-mail: s.v.klauchek@yandex.ru