

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.8.7>

УДК: 537.312:612.821

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОВЕДЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА ПРИ МОНОТОНИИ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ ЭЛЕКТРОДЕРМАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ

А.С. Кремез¹, В.Е. Андреев^{1,2}, В.В. Бонч-Бруевич^{1,3}, В.В. Дементенко³

¹ «НЕЙРОКОМ», 105082, Москва, ул. Большая Почтовая, 39, стр. 1

² Фрязинский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
141190, Фрязино, пл. Введенского, дом 1

³ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп.7

Статья поступила в редакцию 6 декабря 2021 г.

Аннотация. Приведены результаты изучения индивидуального поведения испытуемых в условиях монотонно действующих факторов и обеднённой внешней среды. В ходе эксперимента проводилась регистрация показателей электродермальной активности, показателей точности и своевременности реагирования на сигналы. Кроме этого испытуемые выполняли психологические тесты, определяющие их психоэмоциональную устойчивость и уровень волевой саморегуляции. Анализ показал, что индивидуальные показатели электродермальной активности испытуемых характеризуются значительными различиями, что согласуется с их психологическими особенностями. Предложен вариант оценки психофизиологических затрат испытуемых при выполнении мотивированной задачи. Полученные результаты могут быть использованы в прикладных целях для контроля состояния работоспособности человека-оператора.

Ключевые слова: электродермальная активность, функциональное состояние, бодрствование, монотония, человеческий фактор, психологическое тестирование, человек-оператор, надежность деятельности.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №18-29-02068 мк).

Автор для переписки: Бонч-Бруевич Василий Викторович, v.bonch-bruevich@neurocom.ru

Введение

Известно, что монотония – это специфическое функциональное состояние человека, развивающееся в процессе реализации им однообразной деятельности по наблюдению и реагированию в обеднённой внешней среде [1]. Развитие состояния монотонии ускоряется при воздействии монотонно действующих факторов (звуковых, визуальных, вибрационных) и в условиях гиподинамии [2]. Это функциональное состояние характеризуется снижением общего уровня активации организма, а также такими психофизиологическими и психологическими симптомами, как снижение восприимчивости к внешним раздражителям, ослабление сознательного контроля действий, ухудшение концентрации и распределения внимания, нарушение работы кратковременной памяти. Монотония сопровождается переживаниями скуки, апатии, сонливостью и желанием сменить вид деятельности [3]. Важным аспектом практического использования оценки уровня монотонноустойчивости человека-оператора является отрицательное влияние состояния монотонии на безопасность и эффективность профессиональной деятельности.

В связи с этим предупреждение операторов транспортных средств (водителей, машинистов, диспетчеров и др.) о развитии или возникновении у них состояния монотонии является важной практической задачей обеспечения безопасности профессиональной деятельности. Например, для контроля состояния бодрствования работников локомотивных бригад (РЛБ), чей труд в значительной мере связан с монотонно действующими факторами [4], на сети железных дорог ОАО «РЖД» применяется система ТСКБМ, разработанная АО «НЕЙРОКОМ». Система позволяет отслеживать состояние работоспособности машиниста по уровню и динамике показателей

электродермальной активности (ЭДА) [7, 12]. ЭДА – один из самых известных электрофизиологических параметров, широко используемых в психофизиологических и психологических исследованиях. Существуют тонические изменения электродермальной активности (ТЭДА) и фазические электродермальные реакции (ФЭДР). ТЭДА характеризуются постоянной времени изменений в несколько минут. ФЭДР характеризуются постоянной времени изменения в несколько секунд, которые тесно связаны с ориентировочным рефлексом человека и возникают в ответ на значимые для него стимулы. Кроме того, отмечаются ФЭДР и без внешних стимулов (фоновые спонтанные вегетативные и бессознательные реакции организма – далее спонтанные реакции организма) [11]. В исследованиях [8; 10] были использованы методы регистрации ФЭДР для анализа особенностей снижения уровня бодрствования при выполнении однообразной монотонной деятельности (с нагрузкой на функцию внешнего внимания), а также для изучения мононоустойчивости мужчин и женщин [9]. Для идентификации момента возникновения ФЭДР применялись разработанные алгоритмы выделения ФЭДР по форме регистрируемого сигнала, например, приведённые в работе [8]. В настоящей работе были использованы такие признаки ФЭДР, как форма, амплитуда и изменение частоты следования.

Целью настоящей работы является поиск такого показателя психофизиологических затрат сознательной деятельности человека, который по показателям электродермальной активности позволил бы прогнозировать профессиональное долголетие человека-оператора.

1. Условия и методика проведения эксперимента

В данном эксперименте участвовало 9 испытуемых (мужчин) в возрасте от 26 до 75 лет. Эксперименты проводились в изолированном помещении с искусственным освещением и комфортной температурой в диапазоне 20 – 25 °С. Испытуемые находились в состоянии покоя (полулёжа в кровати) и наблюдали за монитором, на котором демонстрировалась стимульная ситуация,

которая выглядела следующим образом: на экране по кругу по часовой стрелке перемещалось последовательно по фиксированным позициям световое пятно. Изредка, по команде экспериментатора, световое пятно перескакивало через одну позицию (контрольное событие, далее «сигнал»). Испытуемый должен был заметить этот «перескок» и быстро отреагировать нажатием правой рукой на кнопку джойстика. Компьютер фиксировал моменты появления сигнала, время реакции испытуемого, нажатие на кнопку джойстика в отсутствие сигнала или пропуск этого сигнала. Одновременно проводилась регистрация изменений электрических свойств кожи на левой руке (ЭДА).

Всего было проведено 9 экспериментов. В сеансах каждому испытуемому предъявлялось более 30 сигналов. Длительность сеансов, эффективность выполнения задания (количество правильных реакций на сигналы поделённое на количество поданных сигналов) за сеанс в процентах и время суток проведения сеансов (ДО – до обеда, ПОСЛЕ – после обеда) приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики эксперимента

Испытуемый	Длительность эксперимента, сек	Эффективность деятельности, %	Время суток
MD	8300	88.8	ПОСЛЕ
SV	7190	93.9	ДО
BC	4840	41.6	ПОСЛЕ
KV	5650	81.6	ПОСЛЕ
TD	4925	85.7	ПОСЛЕ
EA	2260	73.1	ДО
MA	2600	52.3	ПОСЛЕ
DN	3610	94.4	ПОСЛЕ
ZS	2690	35.7	ДО

2. Регистрация сигналов ЭДА и обработка полученных результатов

Регистрация сигналов ЭДА (с учётом тонической и фазической составляющих) осуществлялась по методу Фере: измерялось сопротивление кожи при пропускании тока величиной менее 10 мкА между двумя электродами, помещёнными на ладонь левой руки. Использовались электроды из нержавеющей стали, выполненные в виде выпуклых пластин. Площадь

электродов составляла около 7 см^2 , межэлектродное расстояние – 5 мм. Измерения проводились без электродной пасты («сухим способом»). Для регистрации использовали аппаратуру производства АО «НЕЙРОКОМ». Данная аппаратура позволяет регистрировать сигналы ЭДА с частотой дискретизации 8 Гц. Эффективная фильтрация сетевых помех с частотой 50 Гц позволяла регистрировать сигналы ЭДА с высокой точностью – среднеквадратичная ошибка измерения сопротивления обычно не превышала 10 Ом. Для средней величины измеряемых сопротивлений около 100 кОм относительная ошибка составляла 0.01%, что вполне достаточно для надёжной регистрации сигналов ФЭДР величиной от 0.2% во всём представляющем интерес диапазоне сопротивлений.

Обработка полученных экспериментальных данных проходила в четыре этапа. На первом этапе проводилось выделение из записи электродермальной активности величины ФЭДР. Для этого использовался алгоритм [9], позволяющий детектировать более 90% фазических сигналов ЭДА величиной более 0.2%. За момент возникновения ФЭДР принималось срединное значение между началом ФЭДР и точкой минимума, с точностью, определяемой частотой дискретизации сигнала 8 Гц [11]. Амплитуды ФЭДР (далее SGR) оценивались в процентах по отношению к ТЭДА.

На рисунке 1 представлен пример выделения ФЭДР из записи электродермальной активности с использованием упомянутого алгоритма.

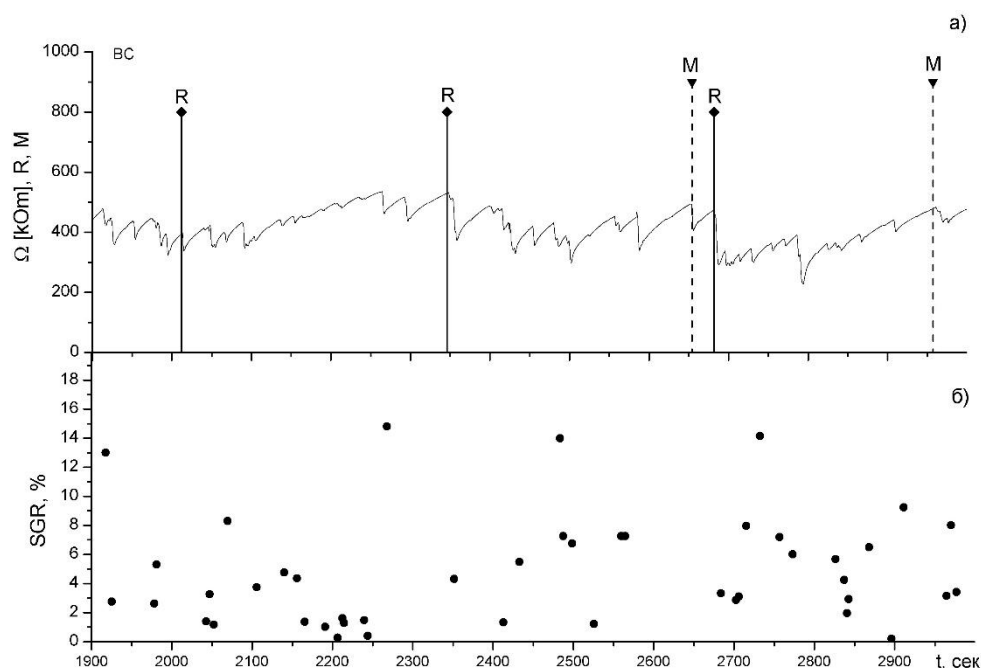


Рис. 1. Пример выделения фазической составляющей электродермальной реакции из записей электродермальной активности испытуемого ВС

На рисунке 1а сплошной кривой представлена зависимость электрокожного сопротивления от времени. Здесь же тёмными треугольниками с вертикальными пунктирными линиями отмечены моменты пропуска испытуемыми сигналов (метки – М), а ромбами с вертикальными штриховыми линиями (метки – R) – моменты правильных реагирований на сигналы. На рисунке 1б показаны амплитуды ФЭДР – SGR в процентах по отношению к ТЭДА.

На втором этапе проведено разделение сигналов ФЭДР по величине амплитуд: в работе принято считать фоновыми спонтанными вегетативные и бессознательные реакции организма, если $SGR \leq 1\%$. А если $SGR > 1\%$, то эти ФЭДР определены как деятельностные ФЭДР, связанные с сознательной активностью испытуемых по контролю за появлением сигналов и реагированию на них. Разделение ФЭДР таким образом ($SGR \leq 1\%$ или $SGR > 1\%$) из общей картины появления ФЭДР основано на их совпадении с различными действиями испытуемых по оценке и реагированию на сигналы заданной стимульной ситуации. В ходе эксперимента оценивалось качество деятельности испытуемых в рамках задания (своевременность и точность реагирования).

Известно, что при выполнении мотивированной задачи частота значимых ФЭДР испытуемых напрямую связана с его психоэмоциональными затратами [2, 5, 6]. Причины появления фоновых спонтанных ФЭДР в должной мере не исследованы, но можно предположить, что они связаны с особенностями психофизиологического состояния человека и всегда в той или иной степени присутствуют у каждого испытуемого.

Так как при выраженной целенаправленной осознанной деятельности человека появляются ФЭДР с $SGR > 1\%$ на временных зависимостях электродермальной активности, посмотрим на зависимость от времени величины, обозначенной как $Ea(t)$, отношения величин накопленных деятельностных ФЭДР с $SGR > 1\%$ за сеанс – $B(t)$ к накопленным фоновым спонтанным ФЭДР с $SGR \leq 1\%$ – $A(t)$:

$$Ea(t) = B(t) / A(t), \text{ где } A(t) = \sum(SGR_i \leq 1\%), \quad B(t) = \sum(SGR_i > 1\%).$$

Эту величину $Ea(t)$ определим как психофизиологические затраты в целенаправленной осознанной деятельности человека. Пример зависимостей $A(t)$ и $B(t)$ от времени показан на рис. 2.

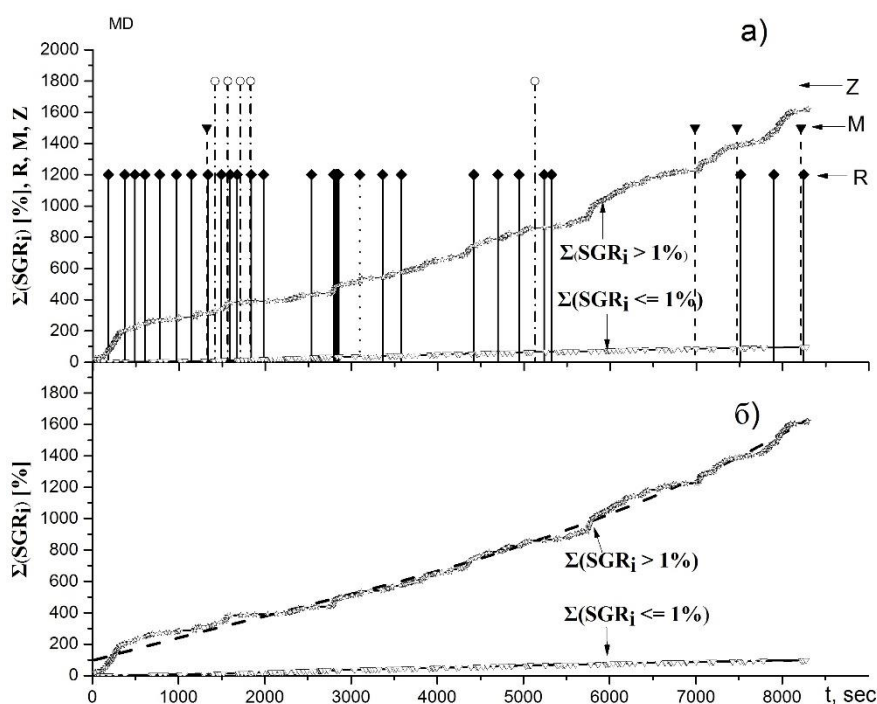


Рис. 2. Зависимости $B(t)$ и $A(t)$ испытуемого MD от времени за сеанс

Зависимости от времени величин $B(t)$ и $A(t)$ показаны на рисунке 2а. Тёмными треугольниками с вертикальными пунктирными линиями отмечены

моменты пропуска испытуемыми сигналов (метка – M), а ромбами с вертикальными штриховыми линиями (метки – R) – моменты правильных реагирований на сигналы. Пустыми кружками с вертикальными штрихпунктирными линиями (метки – Z) – нажатие на кнопку в отсутствие сигнала. На рисунке 2b пунктирными линиями показаны аппроксимация кривых $A(t)$ и $B(t)$ полиномом третьей степени методом наименьших квадратов.

В таблице 2 приведены значения индивидуальных показателей психофизиологических затрат деятельности $Ea(t)$ испытуемых в зависимости от длительности сеанса. Величина $Ea(t)$ рассчитана, для удобства сравнения, в заданные моменты времени. Звёздочкой отмечены аппроксимированные данные. Анализ приведённых значений $Ea(t)$ показывает, что наблюдаются значительные индивидуальные различия указанного показателя у испытуемых как в отдельные моменты времени, так и по ходу эксперимента. Для выявления причин подобных различий показателя $Ea(t)$ было проведено психологическое тестирование испытуемых.

Таблица 2. Значения индивидуальных показателей психофизиологических затрат деятельности $Ea(t)$ испытуемых от длительности сеанса

Испытуемый	$Ea(t) = B(t)/A(t)$, отн. ед.						
	1000 с	2000 с	3000 с	4000 с	5000 с	6000 с	7000 с
MD	40.80	20.57	14.20	13.00	13.47	14.10	16.04
SV	2.20	2.67	3.16	3.60	3.77	4.15	4.75
BC	10.90	13.60	20.40	23.00	28.84*		
KV	6.99	8.85	11.60	13.90	16.86		
TD	14.70	22.23	24.00	24.64	27.00*		
EA	20.60	25.00	16.56*				
MA	6.94	4.95	5.59*				
DN	2.27	5.21	7.03				
ZS	7.14	5.81	6.89*				

На третьем этапе проводился анализ полученных данных с целью выявления маркеров перехода из состояния «бодрствование» в состояние «монотония» и обратно. Такими маркерами являются:

- случаи устойчивого снижения амплитуд и частоты появления ФЭДР перед пропусками сигналов (рис. 3а, 3б);

- случаи устойчивого снижения тонической составляющей ЭДА при переходе из режима «монотония» в режим бодрствования с проявлением утомления (рис.3в).

В большинстве случаев пропуски сигналов испытуемыми сопровождались указанными маркерами динамики ЭДА, что соответствует отключению сознательной деятельности по контролю за стимульной ситуацией в ходе эксперимента.

3. Сравнение показателя $Ea(t)$ с психологическими показателями

На четвёртом этапе проводилось психологическое тестирование всех испытуемых с целью сбора информации, характеризующей их психоэмоциональный статус. Тестирование выполнялось на универсальном психодиагностическом комплексе УПДК-МК фирмы АО «НЕЙРОКОМ». Испытуемыми выполнены три теста-опросника: определение темперамента по Айзенку (EPQ), уровень волевой саморегуляции (ОВС), нервно-психическая устойчивость (НПУ). Полученные данные позволили оценить влияние уровня психоэмоционального статуса испытуемого на его показатель психофизиологических затрат деятельности $Ea(t)$.

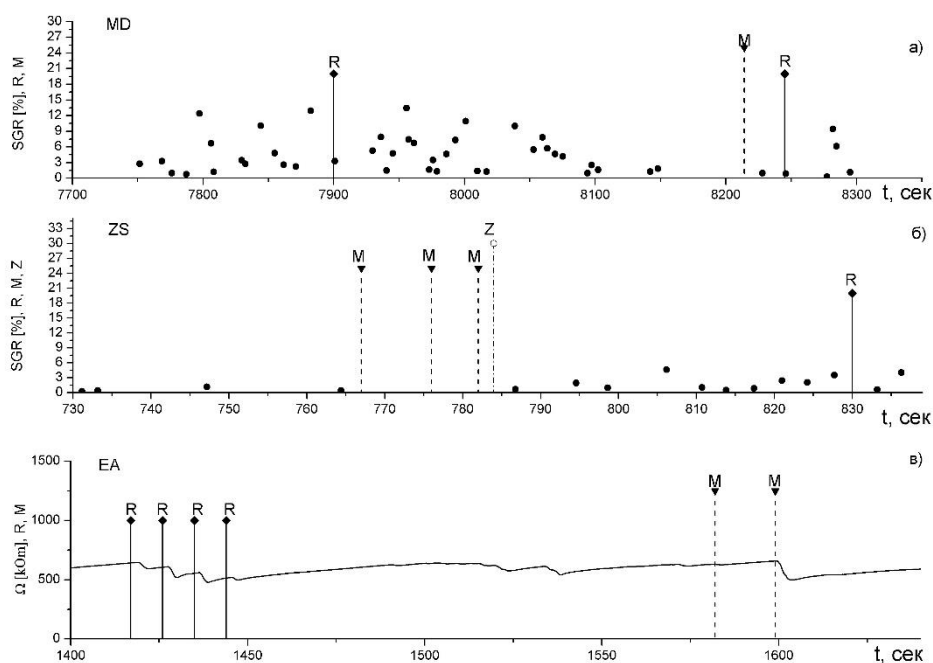


Рис. 3. Примеры маркеров перехода из состояния «бодствование» в состояние «монотония» для трёх испытуемых: 3а, 3б – снижение амплитуды и частоты появления фазической составляющей ЭДА перед пропусками сигналов; 3в – снижение уровня тонической составляющей ЭДА после достижения максимального значения (сплошная кривая)
(Метки на графиках аналогичны меткам на рисунке 2)

3. Сравнение показателя $E_a(t)$ с психологическими показателями

На четвертом этапе проводилось психологическое тестирование всех испытуемых с целью сбора информации, характеризующей их психоэмоциональный статус. Тестирование выполнялось на универсальном психодиагностическом комплексе УПДК-МК фирмы АО «НЕЙРОКОМ». Испытуемыми выполнены три теста-опросника: определение темперамента по Айзенку (EPQ), уровень волевой саморегуляции (ОВС), нервно-психическая устойчивость (НПУ). Полученные данные позволили оценить влияние уровня психоэмоционального статуса испытуемого на его показатель психофизиологических затрат деятельности $E_a(t)$. В таблице 3 приведены результаты тестирования испытуемых по всем трём тестам (И – интроверт, Э – экстраверт, У – «универсал»). Полученные данные позволяют оценить корреляцию психологических характеристик, связанных с процессом функционирования испытуемых, с уровнем психофизиологических затрат их сознательной деятельности. Для этого были построены три зависимости

показателя $Ea(t)$ от психологических показателей (рисунок 4), а именно: от показателя нейротизма (по тесту Айзенка EPQ), от показателя нервно-психической устойчивости (тест НПУ «Прогноз»), от показателя самообладания (по тесту «Оценка волевой саморегуляции»).

Таблица 3. Результаты тестирования испытуемых по трём тестам

№	Испытуемые	Психологические показатели						
		Тест Айзенка (EPQ)			Тест «НПУ»	Тест «Оценка волевой саморегуляции»		
		Психотип [*]	Нейротизм	Интроверсия - экстраверсия	Обратная шкала	Общая оценка	Настойчивость	Самообладание
1	TD	Э	7	16	8	14	9	8
2	SV	Э	4	16	6	21	13	12
3	BC	У	12	11	13	13	7	9
4	MD	И	9	4	17	9	4	6
5	KV	У	13	12	9	14	10	6
6	EA	Э	10	15	9	15	8	11
7	DN	Э	10	17	9	17	13	8
8	ZS	У	3	12	8	23	16	12
9	MA	Э	19	19	21	9	7	4

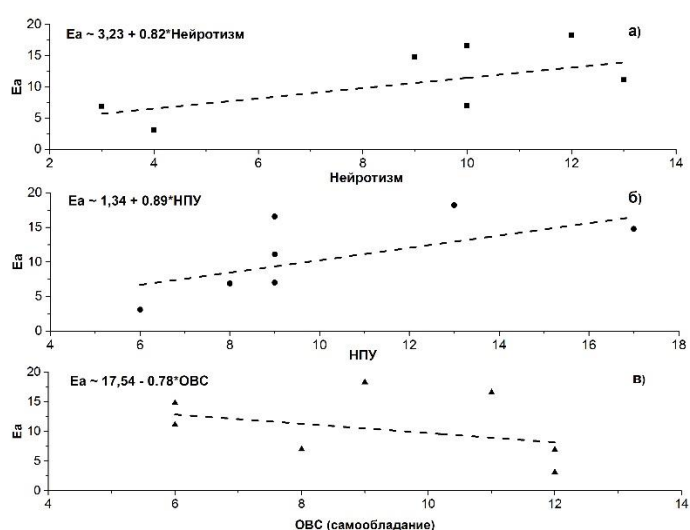


Рис. 4. Экспериментальные зависимости показателя психофизиологических затрат сознательной деятельности $Ea(t)$ от психологических показателей: нейротизма (рис.4а), показателя НПУ (рис.4б), показателя самообладания (рис.4в)

Представленные графики демонстрируют, что психофизиологические затраты сознательной деятельности $Ea(t)$ человека прямо пропорциональны его показателю нейротизма, степени неустойчивости (показатель НПУ имеет обратную шкалу) и обратно пропорциональны его самообладанию. То есть, чем выше показатель нейротизма человека и степень его неустойчивости, тем он имеет больше психофизиологических затрат на выполнение определённого задания. В то же время, чем выше показатель самообладания человека, тем меньше у него психофизиологических затрат на выполнение задания.

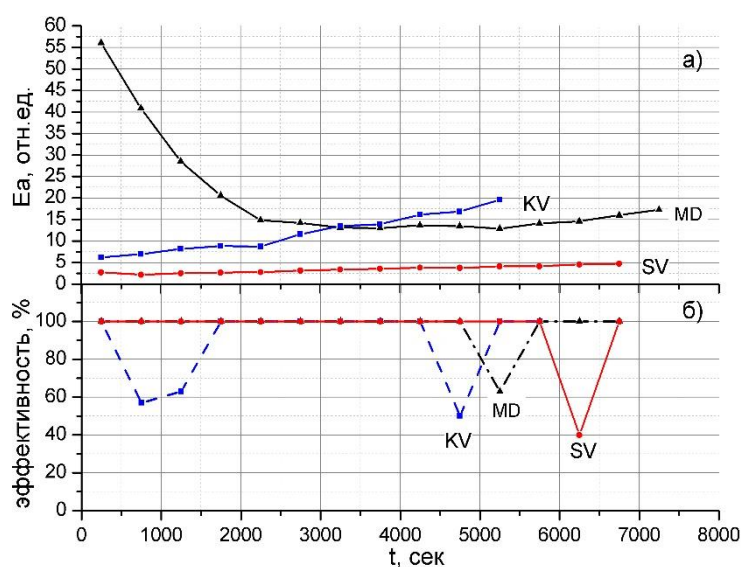


Рис. 5. Примеры экспериментальных зависимостей показателя психофизиологических затрат сознательной деятельности $Ea(t)$ (5а) и эффективности деятельности (5б) от длительности испытания

Испытуемые отличались и по психотипам. Среди испытуемых были выявлены пять экстравертов, три «универсала» и один интроверт, (см. таб. 3). Экспериментальные зависимости показателя психофизиологических затрат сознательной деятельности $Ea(t)$ и эффективности работы в эксперименте от длительности испытания приведены на рисунке 5. Видно, что испытуемый интроверт (MD) уже в начале сеанса имеет большое значение $Ea(t)$, которое затем постепенно убывает, долго находится на постоянном уровне и затем постепенно увеличивается. Экстраверт (SV) обладает низкими значениями $Ea(t)$ в течение всего сеанса. Поведение «универсала» (KV) отличается от других

резким подъёмом уровня $Ea(t)$ в течение всего сеанса. Эффективность труда у них тоже разная (см. рисунок 5б). Различия поведения показателя психофизиологической цены сознательной деятельности $Ea(t)$ от времени для испытуемых, имеющих разные психотипы, полностью согласуются с поведением $Ea(t)$ от времени у тех же испытуемых по другим психологическим показателям.

Заключение

Присутствие фазической электродермальной реакции (ФЭДР) на общей записи ЭДА подтверждает, что данная компонента ЭДА является чувствительной к изменениям функционального состояния человека при переходе из состояния «бодрствование» в состояние «монотония». Следует отметить, что появление подряд нескольких участков устойчивого снижения тонической составляющей ЭДА на общей записи ЭДА может свидетельствовать о приближении перехода в состояние «монотонии» и приводить к пропускам значимых сигналов (значимой информации) человеком-оператором.

Использованное нами разделение сигналов ФЭДР по величине амплитуд на фоновые спонтанные (вегетативные и бессознательные) реакции организма ФЭДР с $SGR \leq 1\%$ и деятельностные ФЭДР с $SGR > 1\%$ позволило сформулировать новый показатель: показатель психофизиологических затрат сознательной деятельности человека $Ea(t)$. Анализ приведённых значений $Ea(t)$ показывает, что наблюдаются значительные индивидуальные различия указанного параметра у испытуемых (см. таблицу 2). У большинства испытуемых рост показателя $Ea(t)$ был связан с увеличением психофизиологических затрат на поддержание сознательного контроля за сигналами и на преодоление состояний утомления и монотонии. У отдельных испытуемых по ходу эксперимента наблюдалось снижение показателя $Ea(t)$, что может быть связано со снижением мотивации к конструктивному продолжению выполнения задания и снижению сознательной активности.

Выявленные в ходе эксперимента устойчивое снижение амплитуд и частоты появления ФЭДР перед пропусками сигналов и устойчивое снижение тонической составляющей ЭДА при переходе из режима «монотония» в режим бодрствования могут быть использованы в качестве дополнительных признаков контроля состояния работоспособности человека-оператора.

Использование показателя психофизиологических затрат сознательной деятельности человека $Ea(t)$ в дальнейшем позволит прогнозировать профессиональное долголетие человека-оператора. Для выработки алгоритма прогнозирования профессионального долголетия необходимо дальнейшее изучение показателя психофизиологических затрат.

Для целей прогнозирования надёжности деятельности человека-оператора в условиях монотонно действующих факторов важно комплексно учитывать результаты его индивидуальных психофизиологических и психологических особенностей.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №18-29-02068 мк).

Литература

1. Леонова А.Б. *Психодиагностика функциональных состояний человека*. Москва, Московский университет. 1984. 200 с.
2. Кальниш В.В. Монотонная деятельность и состояние монотонии. Определение и факторы формирования. *Український журнал з проблем медицини праці*. 2016. Т.46. №1. С.18-30.
3. Бодров В.А., Орлов В.Я. *Психология и надёжность в системах управления техникой*. Москва, Институт психологии РАН. 1998. 288 с.
4. Пушкин В.Н., Нерсесян Л.С. *Железнодорожная психология*. Москва, Транспорт. 1972. 239 с.
5. Фахрутдинова Л.Р. *Пространственно-временные и энергетические основания взаимоотношений психических процессов, переживаний и психических состояний*. Казань, Казанский государственный университет. 2001. 186 с.

6. Холодная М.А., Щербакова О.В., Горбунов И.А., Голованова И.В., Паповян М.И. Информационно – энергетические характеристики различных типов когнитивной деятельности. *Психологический журнал*. 2013. Т.34. №5. С.96-107.
7. Венцевич Л.Е. *Локомотивные устройства обеспечения безопасности движения поездов и расшифровка информационных данных их работы*. Москва, Маршрут. 2006. 328 с.
8. Дементиенко В.В., Дорохов В.Б., Коренева Л.Г., Марков А.Г., Тарасов А.В., Шахнарович В.М. Гипотеза о природе электродермальных реакций. *Физиология человека*. 2000. Т.26. №2. С.124-131.
9. Дементиенко В.В., Дорохов В.Б., Коренева Л.Г., Марков А.Г., Тарасов А.В., Шахнарович В.М. Половые различия в электродермальной активности при разных уровнях бодрствования. *Физиология человека*. 2000. Т.26. №4. С.136-139.
10. Дорохов В.Б., Дементиенко В.В., Коренева Л.Г., Марков А.Г., Шахнарович В.М. Электродермальные показатели субъективного восприятия ошибок в деятельности при наступлении дремотного состояния. *Журнал высшей нервной деятельности*. 2000. Т.50. №2. С.206-218.
11. Миргородский В.И., Дементиенко В.В., Дорохов В.Б., Герасимов В.В., Пешин С.В., Шахнарович В.М. Сравнение индивидуальных особенностей электродермальной реакции при совместном просмотре видеофильмов. *Экспериментальная психология*. 2010. Т.3. №4. С.5-15.
12. Применение системы ТСКБМ на железнодорожном транспорте [web]. *НЕЙРОКОМ*. Дата обращения: 10.11.2021. URL: <https://www.neurocom.ru/products/ukb/tskbm-basic/>

Для цитирования:

Кремез А.С., Андреев В.Е., Бонч-Бруевич В.В., Дементиенко В.В. Прогнозирование индивидуальных особенностей поведения человека при монотонии по показателям электродермальной активности. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.8.7>