

И.В. Федотова ¹, М.М. Некрасова ², Е.В. Рунова ², А.В. Бахчина ³, С.А. Аширова ¹,
В.В. Кожевников ³, И.С. Шишалов ³, С.Б. Парин ³, С.А. Полевая ²

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ У ВОДИТЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ

¹ ФБУН «Нижегородский НИИ гигиены и профпатологии» Роспотребнадзора (Нижний Новгород)

² ГБОУ ВПО «Нижегородская государственная медицинская академия» Минздрава России
(Нижний Новгород)

³ ГБОУ ВПО «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (Нижний Новгород)

Статья посвящена разработке современных телеметрических методов оперативной оценки функционального состояния водителей автотранспортных средств в процессе производственной деятельности. Исследование влияния нагрузок, обусловленных профессиональными факторами, на сердечно-сосудистую систему водителей проводили с помощью мобильных устройств, включающих портативные датчики и накопительную часть для сбора информации (смартфон). Разработанные компьютерные программы использовали для вычисления спектральных показателей вариабельности сердечного ритма (ВСР). Показана высокая информативность вейвлет-преобразования для идентификации функционального состояния сердечно-сосудистой системы. При развитии утомления у водителей наблюдается редукция ВСР, увеличение влияния симпатического компонента в регуляции, увеличение индекса вегетативного баланса. Выраженность изменений ВСР соответствует уровню производственной нагрузки и характеризует степень индивидуальной реакции, также позволяет определить стресс-индуцирующее воздействие. Метод беспроводной кардиоритмографии является перспективным для создания системы персонализированного мониторинга с целью повышения качества жизни и сохранения профессионального здоровья водителей.

Ключевые слова: мониторинг функционального состояния, водители, вариабельность сердечного ритма, телеметрия, стресс

TELECOMMUNICATION TECHNOLOGIES FOR MONITORING OF FUNCTIONAL STATUS OF DRIVERS DURING THEIR WORK

I.V. Fedotova ¹, M.M. Nekrasova ², E.V. Runova ², A.V. Bakhchina ³, S.A. Ashirova ¹,
V.V. Kozhevnikov ³, I.S. Shishalov ³, S.B. Parin ³, S.A. Polevaya ²

¹ Nizhny Novgorod Scientific Research Institute for Hygiene and Occupational Pathology, Nizhny
Novgorod

² Nizhny Novgorod State Medical Academy, Nizhny Novgorod

³ Nizhny Novgorod State University named after N.I. Lobachevsky, Nizhny Novgorod

The article is devoted to development of modern telemetric methods for an on-line evaluation of functional status of vehicle drivers during their work. The study of occupational load effect on cardiovascular system was performed with the use of mobile devices included portable sensors and storage device to collect information (smartphone). The developed computer programs were used to calculate spectral indices of heart rhythm variability (HRV). A high self-descriptiveness of wavelet transform for identification of functional status of cardiovascular system was shown. The reduction of HRV, increase of sympathetic component in regulation and increase of vegetative balance index were observed in drivers by fatigue. The intensity of HRV changes met with occupational load level and characterized degree of individual response as well as allowed to detect exposure induced the stress. A wireless cardiorhythmography is a perspective method for creating personal monitoring system for increasing quality of the drivers' life and for their health preservation.

Key words: monitoring of functional status, drivers, heart rhythm variability, telemetry, stress

ВВЕДЕНИЕ

Категорию «профессиональное здоровье» следует рассматривать не только как экономический показатель наряду с прибыльностью производства, но и в первую очередь как общечеловеческую ценность, одну из основных составляющих качества жизни, как необходимое условие долголетия работника. В настоящее время актуальным является развитие информационных технологий, направленных на сохранение здоровья, что особенно важно для профессиональной деятельности, связанной со значительными нервно-эмоциональными нагрузками. Проводятся многочисленные мультидисциплинарные исследования с применением мобильных диагностических систем на основе Bluetooth, которые позволяют проводить оценку функционального состояния в условиях реальной деятельности, что, в отличие от стационар-

ных условий, дает преимущество для принятия мер предупредительного характера с целью снижения риска для здоровья [1, 7, 8, 9, 10, 15]. В то же время следует отметить, что к настоящему моменту нет однозначного ответа о безопасности радиоизлучения устройств Bluetooth для здоровья человека с учетом того, что подходы по использованию коммуникационных технологий на основе Bluetooth в аналогичных биомедицинских приложениях известны и стремительно развиваются [11, 14], необходимо проведение дополнительных исследований по данному вопросу.

Целью настоящей работы стали создание и апробация принципиальной схемы телеметрии для мониторинга сердечного ритма, изучения динамики вегетативной регуляции и оперативной оценки функционального состояния организма в условиях управления автотранспортным средством с помощью неин-

вазивных устройств, не являющихся помехой в работе человека-оператора сложных систем. В перспективе развитие телекоммуникационных технологий применительно к водителям общественного транспорта будет способствовать решению комплексной задачи – сохранению здоровья водителей и улучшению обеспечения безопасности дорожного движения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились при информированном согласии водителей автобусов марки ЛИАЗ 52-56, выполняющих перевозку пассажиров по трем городским маршрутам, в условиях естественной профессиональной деятельности. Были проанализированы данные ВСП, полученные при исследовании 6 водителей (возраст – $51,6 \pm 4,8$, стаж – $29,4 \pm 4,6$) при выполнении ими 4 рейсов в течение рабочей смены.

В процессе измерения производилось протоколирование контекста профессиональной деятельности с регистрацией смены режимов движения и ситуаций по времени, составлялась временная диаграмма событий. С целью оценки физиологической значимости событий сравнивали средние значения показателей ВСП, полученные при однотипных контекстах ($M \pm m$).

Непрерывная регистрация сердечного ритма проводилась в режиме телеметрии в процессе выполнения 4 рейсов (с 9:50 до 14:50). Для непрерывных телеметрических измерений сердечного ритма в условиях естественной деятельности использовался разработанный нами комплекс, состоящий из беспроводного датчика ЭКГ (HxM, Zephyr Technology, размеры – 65×32 мм, вес – 17 г) и смартфона (или персонального компьютера) со специализированным программным обеспечением [6]. Конструкция датчика ЭКГ обеспечивает надежную фиксацию его на теле человека и не создает неудобств для исследуемого.

Передача данных на смартфон или персональный компьютер организована по беспроводному каналу Bluetooth. Предельное расстояние передачи сигнала – 10 м. Последовательности R-R интервалов и спектры ВСП, полученные в результате работы комплекса, полностью соответствуют данным ($p > 0,995$ по критерию Стьюдента), регистрируемым стандартным оборудованием, рекомендуемым для проведения

исследований ВСП в стационарных условиях [2]: «Поли-Спектр» (Нейрософт) и кардиоанализатор «Анкар-131» (Медиком).

При анализе результатов исследования вычислялись суммарная мощность спектра ВСП – TP (мс²), мощность спектра в области очень низких частот – VLF (мс²), мощность спектра в области низких частот – LF (мс²), мощность спектра в области высоких частот – HF (мс²), соотношение мощностей спектра в области низких и высоких частот (индекс вегетативного баланса) – LF / HF. Для увеличения разрешения по времени в описании динамики вегетативной регуляции проводился динамический Фурье-анализ с окном 100 с и шагом 10 с (в отличие от стандартного анализа с окном 300 с и шагом 100 с).

Наряду с основными методами анализа ВСП (статистический, спектральный) [2, 3], отражающими разные аспекты состояния систем регуляции, был применен метод непрерывного вейвлет-преобразования.

Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием программного пакета Statistica 6.0. Методы обработки данных включали дисперсионный, регрессионный и корреляционный анализ. В анализ включались корреляции с высоким уровнем значимости ($p < 0,05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенного исследования было зарегистрировано 2 вида динамики вегетативных режимов регуляции ВСП (табл. 1). В первом случае при управлении автобусом без перерывов между рейсами у водителя наблюдалось развитие общего утомления, выражающегося в последовательной от рейса к рейсу редукции общей мощности спектра (TP) ($r = -0,65$; $p = 0,03$) (2 водителя из 6). При этом движение в «пробках» усугубляло ухудшение функционального состояния, вызывало ещё большее снижение TP ($r = -0,74$; $p = 0,02$) и повышение уровня симпатической регуляции, отражающееся в росте мощности низкочастотной части спектра (LF) и подъеме индекса вегетативного баланса LF/HF ($r = 0,66$; $p = 0,03$). В исследованиях было показано, что информационные нагрузки вызывают утомление, которое ассоциируется с симпатической гиперактивацией [12].

Таблица 1

Динамика спектральных показателей по рейсам (M (m))

№ рейса	TP, мс ²	LF, мс ²	HF, мс ²	LFn, %	HFn, %	LF / HF
1 вид						
1	726,6 (400,1)	337,9 (177,1)	54,2 (22,1)	84,8 (5,6)	15,1 (5,6)	6,7 (3,4)
2	520,4 (251,9)	294,4 (146,3)	28,8 (12,9)	89,7 (4,9)	10,2 (4,9)	11,4 (6,9)
3	394,7 (169,8)	227,2 (110,1)	20,3 (10,0)	90,8 (5,3)	9,2 (5,3)	13,4 (7,6)
4	539,0 (296,7)	291,5 (133,1)	27,1 (19,1)	90,8 (4,5)	9,2 (4,5)	12,0 (5,5)
2 вид						
1	989,6 (448,0)	276,0 (159,8)	79,8 (33,7)	75,0 (10,3)	24,7 (10,2)	3,9 (2,3)
2	1235,7 (781,8)	294,3 (150,0)	103,1 (36,6)	71,4 (11,4)	28,6 (11,4)	3,2 (2,3)
3	1095,7 (491,6)	296,4 (189,5)	105,5 (37,2)	69,8 (13,0)	30,2 (13,0)	3,0 (1,8)
4	1420,5 (793,2)	355,6 (211,4)	166,2 (62,2)	65,1 (11,7)	34,9 (11,7)	2,3 (1,4)

Во втором случае наблюдались характерные изменения динамики ВСР уже в течение одного рейса. Так, отмечена сильная прямая корреляция значений ТР ($r = 0,82$; $p = 0,017$) в зависимости от дорожной ситуации: при большом количестве «пробок» на маршруте наблюдалось увеличение показателя ТР, а при условии практического их отсутствия – снижение.

Анализ ритмограмм был проведен при сопоставлении с диаграммой событий, который выявил следующие особенности. При движении в штатном (контролируемом) режиме, при запланированных действиях происходит подавление вегетативной регуляции, на вейвлет-спектрограммах наблюдается снижение амплитуды во всем частотном диапазоне (0,6–0,05 Гц). При возникновении незапланированных ситуаций (внезапное торможение на светофорах, маневр при нарушении правил другими участниками движения), связанных с необходимостью быстрой реакции, происходит незамедлительная смена вегетативного управления с увеличением мощности каждого компонента (табл. 2).

Таблица 2
Значение спектральных показателей при запланированных и незапланированных событиях (М (m))

Показатели	Запланированные события	Незапланированные события
ТР, 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: * – $p < 0,01$.

Это может быть связано с регулирующим влиянием корковых структур. С помощью нейроимиджинговых технологий при симуляционном управлении транспортным средством было выявлено, что при запланированных и незапланированных действиях происходит

активация различных зон коры. Так, с запланированными действиями ассоциируется активность в премотормой, теменной коре, в области мозжечка, при неожиданных опасных событиях происходит активация в боковой затылочной, теменной областях, островке и более задних отделах премотормой коры [13].

По типичной динамике общей мощности спектра ТР и мощности симпатического компонента LF были идентифицированы незапланированные события, которые вызывают стрессовую реакцию организма. Для данного явления характерны следующие изменения [4, 5]: во время наступления события наблюдалось резкое увеличение мощности во всех диапазонах с преобладанием низкочастотного компонента LF, что указывает на фазу активации систем регуляции, которая через 2–3 минуты сменяется фазой доминирования симпатической регуляции на фоне резкого снижения общей мощности ТР (рис. 1). Можно предполагать, что это угнетение общей мощности спектра обусловлено активацией на первой стадии стресса не только симпатoadrenalовой, но и эндогенной опиоидной системы, которая, как известно, обладает выраженными гипобитическими свойствами [4, 5, 15]. Характерно, что при торможении на светофоре также регистрировалось параллельное возрастание показателей как общего спектра мощности ТР, так и индекса вегетативного баланса LF/HF. Таким образом, можно выявлять факторы риска нарушений функции сердечно-сосудистой системы и степень хронизации стресса в условиях профессиональной деятельности у водителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Маркером утомления при вождении автотранспортного средства является редукция общей мощности спектра ТР ВСР, при этом парасимпатический компонент HF также снижается, а симпатический компонент LF повышается. Влияние на вегетативную регуляцию штатных ситуаций (остановки по маршруту) и внештатных событий (светофоры, маневры) оказывается различным: при запланированных событиях изменения частотной характеристики сердечного ритма минимальны, внезапные изменения дорожной ситуации приводят к «вспышкам» симпатической

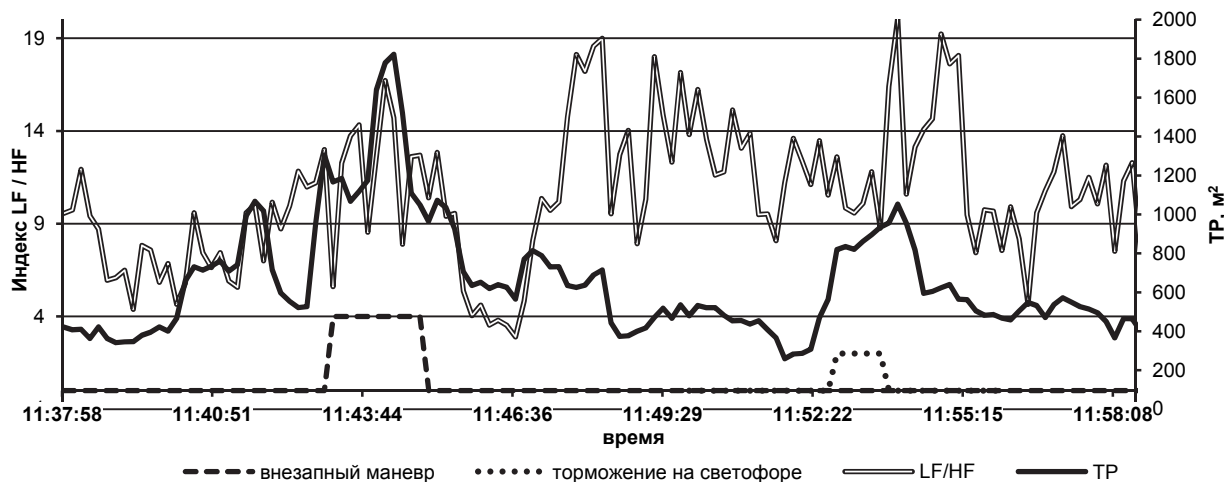


Рис. 1. Динамика спектральных показателей при развитии стрессогенной реакции.

активации. Негативные изменения в системе управления сердечным ритмом при движении в пробках во многом происходят на фоне развития утомления, снижения резервов регуляции.

Использование возможностей беспроводной связи позволяет создавать автоматизированные информационные системы для сбора, регистрации и анализа данных с целью выявления степени функционального напряжения при определенных уровнях производственной нагрузки и обоснования рекомендаций, направленных на профилактику нарушений состояния здоровья. При этом данные технологии позволяют получить оперативную информацию и своевременно реагировать в ситуациях, требующих вмешательства, тем самым повысить безопасность участников дорожного движения.

Работа выполнена при частичном финансировании по гранту ФЦП (соглашение № 14.В37.21.0043).

ЛИТЕРАТУРА

1. Баевский Р.М., Берсенева А.П., Берсенев Е.Ю. Использование принципов донозологической диагностики для оценки функционального состояния организма при стрессорных воздействиях (на примере водителей автобусов) // Физиология человека. – 2009. – № 1 (35). – С. 41–51.
2. Баевский Р.М., Иванов Г.Г., Чирейкин Л.В., Гаврилушкин А.П. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем: метод. реком. // Вестник аритмол. – 2001. – № 24. – С. 65–87.
3. Variability of heart rate: Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Working Group of the European Society of Cardiology and the North American Society of Cardiology. // Вестник аритмол. – 1999. – № 11. – С. 53–78.
4. Парин С.Б., Чернова М.А., Полевая С.А. Адаптивное управление сигналами о рассогласовании в когнитивных процессах: роль эндогенной опиоидной системы // Известия вузов: Прикладная нелинейная динамика. – 2011. – Т. 19, № 6. – С. 65–73.
5. Парин С.Б., Яхно В.Г., Цверов А.В., Полевая С.А. Психофизиологические и нейрохимические механизмы стресса и шока: эксперимент и модель // Вест. Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2007. – № 4. – С. 190–196.
6. Полевая С.А., Каратушина Д.И., Шемагина О.В., Бахчина А.В. и др. Биологическая активность информационных образов в виртуальной компьютерной среде // Сб. науч. тр. XV Всероссийской науч.-техн. конф. «Нейроинформатика-2013». – Нижний Новгород, 2013. – С. 11–20.
7. Aubert A., Verheyden B., d'Ydewalle C., Beckers F. et al. Effects of mental stress on autonomic cardiac modulation during weightlessness // Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol. – 2010. – N 298 (1). – P. 202–209.
8. Fredrikson M., Blumenthal J., Evans D., Sherwood A. et al. Cardiovascular responses in the laboratory and in the natural environment: is blood pressure reactivity to laboratory-induced mental stress related to ambulatory blood pressure during everyday life? // J. Psychosom. Res. – 1989. – N 33 (6). – P. 753–762.
9. Hong S., Yang Y., Lee J., Yang H. et al. Ambulatory stress monitoring with a wearable bluetooth electrocardiographic device // Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. – 2007. – P. 644–647.
10. Lerman S.E., Eskin E., Flower D.J., George E.C. et al. Fatigue risk management in the workplace // JOEM. – 2012. – Vol. 54, N 2. – P. 231–258.
11. Martin T., Ding H., D'Souza M., Karunanithi M. Evaluation of bluetooth low power for physiological monitoring in a home based cardiac rehabilitation program // Stud. Health Technol. Inform. – 2012. – N 178. – P. 124–129.
12. Mizuno K., Tanaka M., Yamaguti K., Kajimoto O. Mental fatigue caused by prolonged cognitive load associated with sympathetic hyperactivity // Behavioral and Brain Functions. – 2011. – N 7. – P. 1–17.
13. Spiers H.J., Maguire E.A. Neural substrates of driving behavior // NeuroImage. – 2007. – N 36. – P. 245–255.
14. Walters D.L., Sarela A., Fairfull A., Neighbour K. et al. A mobile phone-based care model for outpatient cardiac rehabilitation: the care assessment platform (CAP) // BMC Cardiovasc. Disord. – 2010. – N 28. – P. 10–15.
15. Ydwine J., Derek W. Cardiovascular reactivity in real life settings: Measurement, mechanisms and meaning // Biol. Psychol. – 2011 – N 86 (2). – P. 98–105.

Сведения об авторах

Федотова Ирина Викторовна – доктор медицинских наук, заведующая отделом гигиены ФБУН «Нижегородский научно-исследовательский институт гигиены и профпатологии» (E-mail: irinavfed@mail.ru)

Полевая Софья Александровна – доктор биологических наук, заведующая отделом нейрофизиологии и экспериментального моделирования НИИ ПФМ ГБОУ ВПО НижГМА Минздрава России (E-mail: vostokov@appl.sci.nnov.ru)

Парин Сергей Борисович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией психофизиологии ФСН ГОУ ВПО «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (E-mail: parins@mail.ru)

Некрасова Марина Михайловна – кандидат биологических наук, ассистент кафедры гигиены труда и коммунальной гигиены ГБОУ ВПО НижГМА Минздрава России, научный сотрудник отдела гигиены ФБУН «Нижегородский научно-исследовательский институт гигиены и профпатологии» Роспотребнадзора (603132, г. Нижний Новгород, ул. Голубева 4, 105, тел. +7-902-780-90-63; e-mail: nmarya@yandex.ru)

Рунова Екатерина Владимировна – кандидат биологических наук, научный сотрудник отдела нейрофизиологии и экспериментального моделирования НИИ ПФМ ГБОУ ВПО НижГМА Минздрава России

Бахчина Анастасия Владимировна – аспирант кафедры психофизиологии ФСН ГОУ ВПО «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Аширова Светлана Александровна – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник отдела гигиены ФБУН «Нижегородский научно-исследовательский институт гигиены и профпатологии» Роспотребнадзора

Кожевников Валерий Валерьевич – инженер лаборатории когнитивной психофизиологии ФСН ГОУ ВПО «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Шишалов Иван Сергеевич – инженер лаборатории когнитивной психофизиологии ФСН ГОУ ВПО «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»