

# **Интеграция VR-комплексов с оптико-физическими датчиками систем биологической обратной связи для оценки психической напряжённости лиц ответственных профессий**

**О. С. Бурделёв<sup>1)</sup>, В. А. Фираго<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup> Научно-методическое учреждение Белорусского государственного университета  
«Республиканский центр проблем человека», Минск, Беларусь,  
e-mail: [jahhu@yandex.ru](mailto:jahhu@yandex.ru)

<sup>2)</sup> Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь,  
e-mail: [firago@bsu.by](mailto:firago@bsu.by)

На примере интеграции набора оптико-физических физиологических датчиков с комплексом виртуальной реальности (VR) рассматриваются современные тренды применения систем биологической обратной связи (БОС-VR) для объективной оценки уровня психической напряжённости специалистов ответственных профессий в экстремальных и аварийных условиях деятельности. Особое внимание уделяется применению неинвазивных методов регистрации пульсовых, дыхательных и температурных показателей для адаптивного управления виртуальной тренировочной нагрузкой в стрессовых и экстремальных сценариях.

**Ключевые слова:** БОС-VR; фотоплетизмография; психофизиологические датчики; психическая напряжённость; адаптивное управление.

## **Integration of VR complexes with optical-physical sensors of biological feedback systems for assessing the mental stress of individuals in responsible professions**

**O. S. Burdzialiou, V. A. Firago**

<sup>1)</sup> Republican Center for Human Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus,  
e-mail: [jahhu@yandex.ru](mailto:jahhu@yandex.ru)

Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: [firago@bsu.by](mailto:firago@bsu.by)

The paper analyzes the difficulties encountered by foreign students in the process of working with printed text (folding information, developing long-term memory, highlighting the main idea in small of the text and retelling it). Using the example of integrating a set of optical-physical physiological sensors with a virtual reality (VR) complex, we examine current trends in the use of biological feedback systems (BOS-VR) for objectively assessing the level of mental stress experienced by professionals in high-responsibility occupations in extreme and emergency conditions. Particular attention is paid to the use of non-invasive methods for recording pulse, respiratory, and temperature indicators for adaptive control of virtual training loads in stressful and extreme scenarios.

**Keywords:** BOS-VR; photoplethysmography; psychophysiological sensors; mental stress; adaptive control.

## **Введение**

Современные технологии виртуальной реальности (VR) в сочетании с системами биологической обратной связи (БОС) открывают перспективы дальнейшего развития компьютеризированных тренажеров для объективной оценки и управления

психофизиологическим состоянием человека в условиях стрессовых и экстремальных нагрузок [1–4]. Возможность создавать тренировочные сценарии сложных ситуаций в совокупности с объективной оценкой основных физиологических параметров лиц, принимающих решения, наиболее привлекательные стороны концепции развития современных VR-тренажеров с системой биологической обратной связи [1, 3–6]. Высокая реалистичность и интерактивность, свойственная этим тренажерам, обеспечивает эффективное обучение действиям в стрессовых условиях и быстрое освоение необходимых навыков. Также появляется возможность объективного отбора лиц сложных и ответственных профессий, экономя при этом существенные средства на проведение их предварительного обучения.

Основа системы обратной биологической связи – комплекс оптико-физических датчиков. Эти датчики позволяют следить за текущими значениями физиологических параметров организма, что дает информацию для управления психической нагрузкой, т. е. последовательностью заданий выполняемого сценария. Оптико-физические датчики регистрируют изменения оптических свойств тканей при пульсовых колебаниях кровенаполнения сосудов. Фотоплетизмографический датчик, содержащий инфракрасный полупроводниковый излучатель и фототранзистор, позволяет неинвазивно регистрировать динамику сердечного ритма и вариабельность пульса, что в совокупности с данными других датчиков позволяет рассчитать индекс психической напряжённости, отражающий уровень функционального состояния центральной нервной системы.

В докладе на примере апробации комплекса БОС-VR с внедренными оптико-физическими и электронными датчиками рассматриваются направления дальнейшего развития методик применения биологической обратной связи в имитационных тренажерах [1, 2, 4].

## **1. Проблемы, требующие своего решения, при введении БОС**

При формировании проектов, имеющих целью создание соответствующего VR-БОС тренажера, приходится решать и ряд методических проблем, возникающих при получении данных от комплекса датчиков, их обработки и формирования на их основе оценки психоэмоционального состояния тренируемого оператора или специалиста [1, 5-8].

При создании VR-БОС комплекса, разработанного в Республиканском центре проблем человека и предназначенного для объективной оценки психоэмоционального состояния и адаптивного управления нагрузкой в тренировочных сценариях, пришлось решать следующие задачи:

- создание аппаратно-программного модуля для неинвазивной регистрации физиологических параметров;
- разработка методики расчёта индекса напряжённости по данным используемого набора датчиков;
- создание алгоритмов внедрения потока данных в систему VR, необходимое для обеспечения в реальном масштабе времени обратной связи между физиологическим состоянием обучаемого и предъявляемыми визуально-аудиальными сценариями;

- апробация эффективности адаптивной коррекции VR-сценариев в зависимости от уровня стресса и функционального состояния обучаемого.

Наиболее удобным для неинвазивной оценки частоты сердечных сокращений и вариабельности ритма оказался фотоплетизмографический датчик. Исследование зависимости амплитуды пульсовых колебаний фотоплетизмограммы от длины волны показало, что целесообразно использовать ее регистрацию в области спектра 880 нм [9–12]. В этой области спектра излучение проникает глубже в ткань по сравнению с излучением в видимой области спектра. Однако, этот вопрос требует дальнейшего исследования при применении дифференциальной оценки кровенаполненности сосудов микроциркуляторного русла, поскольку двухволновой фотоплетизмографический датчик с регистрацией переменных и постоянных составляющих фотоплетизмограмм даст возможность сравнивать кровенаполненность петлевых капилляров в коже с кровенаполненностью сосудов более глубоких слоев тканей.

Для получения других данных, необходимых для комплексного определения индекса психической напряженности на основе анализа пульсовых интервалов (RR-интервалы) и вариационного пульсометрического анализа, использовались:

- датчик кожно-гальванической реакции (КГР) для оценки эмоциональной активации;
- датчик дыхания на эффекте Холла – для анализа дыхательных паттернов и частоты;
- температурный датчик, регистрирующий изменения периферического кровообращения [3, 5].

При использовании фотоплетизмографических (ФПГ) и кожно-гальванических (КГР) датчиков в VR-БОС-комплексах возникают трудности, связанные с влиянием на регистрируемые сигналы внешних и физиологических факторов. ФПГ-датчик чувствителен к влиянию движений, вибраций, освещённости и температуры кожи, что может вызывать артефакты и снижать точность анализа сердечного ритма. Амплитуда пульсовых колебаний снижается при охлаждении или стрессовой вазоконстрикции, что осложняет вычисление кардиоинтервалов. КГР-датчик, зависит от качества контакта электродов, влажности, состояния кожи и стабильности температуры, что вызывает снижение амплитуды при длительном воздействии стимулов. Совместная обработка сигналов требует синхронизации, фильтрации и нормализации, поскольку временные характеристики КГР и ФПГ различаются. Для интегральной оценки функционального состояния пользователя и уровня стресса используется индекс психической напряжённости, рассчитываемый по методике Баевского [13]. Несмотря на указанные сложности, сочетание ФПГ и КГР-датчиков позволяет комплексно оценивать физиологические и эмоциональные реакции в реальном времени, повышая достоверность данных в системе биологической обратной связи.

Для определения степени участия грудного либо абдоминального отдела в процессе дыхания в системе БОС используются два типа датчиков – на основе эффекта Холла и тензометрический. Датчик Холла отличается высокой чувствительностью к малым движениям грудной клетки и простотой интеграции, но чувствителен к внешним магнитным полям и требует точной калибровки. Тензометриче-

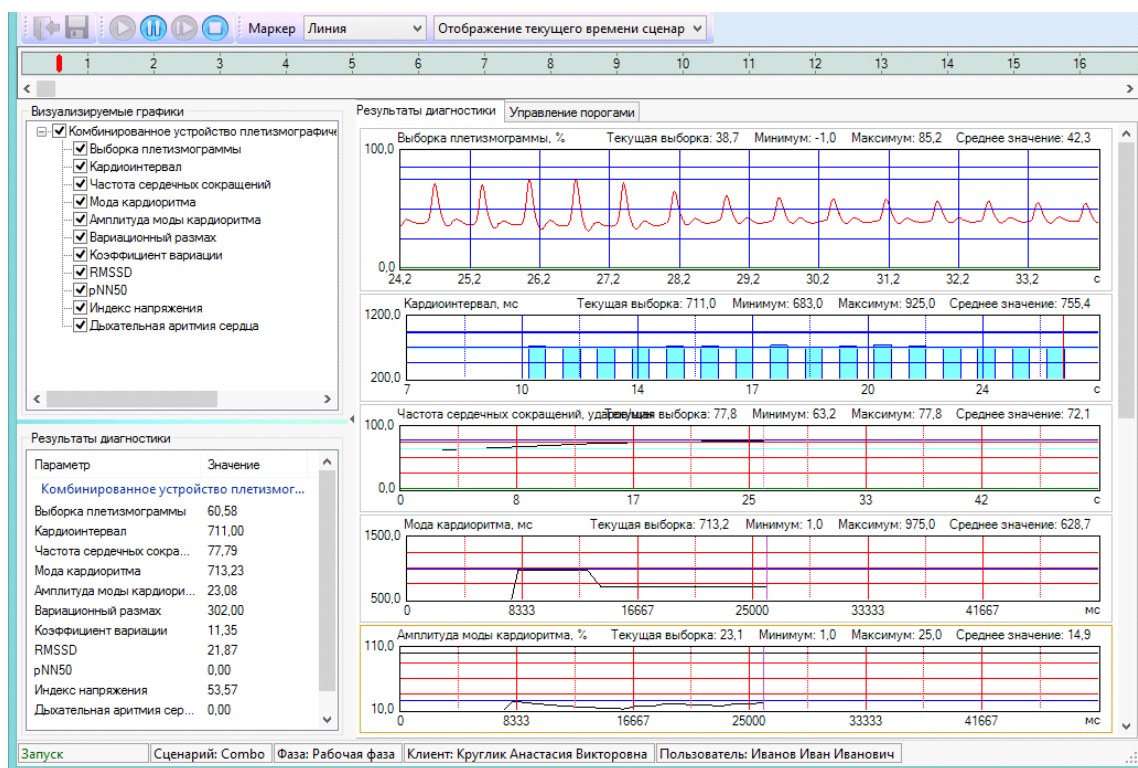
ский датчик обеспечивает высокую точность измерения амплитуды дыхательных движений и устойчив к помехам, однако требует плотного крепления и может вызывать дискомфорт при длительном использовании.

## 2. Пример апробации и применения

Апробация комплекса проводилась в лаборатории психофизиологического обеспечения Белорусской АЭС, где VR-БОС-комплекс применяется для тренировки персонала, критически влияющего на безопасность эксплуатации. Разработанная система позволяет объективно оценивать функциональное состояние специалистов и формировать рекомендации по индивидуальной саморегуляции и профессиональной подготовке.

В настоящее время ведутся разработки VR-сценариев, в которых моделируются действия при аварийных и нештатных ситуациях, с контролем внимания при работе с множественными консолями, а также адаптации оператора к дефициту времени и высокому риску ошибок. Система физиологической обратной связи фиксирует динамику пульса, КГР и дыхания, отображая их на экране инструктора. Это позволяет оценить психофизиологическую устойчивость персонала, выявлять индивидуальные реакции на стрессовые стимулы и корректировать режимы тренировки с учётом особенностей каждого обучаемого.

Дополнительно система обеспечивает возможность анализа вариабельности измеряемых параметров и интеграции данных с адаптивными алгоритмами VR-среды, что повышает точность оценки функционального состояния и эффективность тренировки в реальном времени.



Форма представления информации с фотоплетизмографического датчика при исполнении сценария

В докладе приводятся результаты оценок эффективности применения VR-БОС-комплекса при тренировках персонала.

### **Заключение**

Интеграция VR-технологий с фотоплетизмографическими, кожно-гальваническими, дыхательными и температурными датчиками позволяет создавать современные тренажерные комплексы с биологической обратной связи, которые дают возможность объективно в реальном масштабе времени оценивать психофизиологическое состояние человека в условиях стрессовых и экстремальных нагрузок. Использование описываемого набора датчиков обеспечивает комплексную регистрацию сердечного ритма, вариабельности пульса, эмоциональной активации, дыхательных паттернов и изменений периферического кровообращения, что позволяет рассчитывать индекс психической напряжённости по методике Баевского.

Применение VR-БОС-комплекса с адаптивной обратной связью повышает эффективность обучения действиям в стрессовых ситуациях, позволяет корректировать нагрузку в реальном времени и улучшает качество подготовки специалистов ответственных профессий. Несмотря на технические и методические сложности, связанные с наличием влияния артефактов на регистрируемые сигналы и индивидуальными особенностями тренируемых, комплекс демонстрирует высокую информативность и объективность оценки функционального состояния, открывая перспективы для её применения в энергетике, медицине, силовых структурах, авиации и других сферах, где критически важна точность действий и стрессоустойчивость лиц, принимающих ответственные решения.

### **Библиографические ссылки**

1. Лебедев А. Н. Биологическая обратная связь в психофизиологии человека. – М.: Наука, 2008.
2. Гребенников И. А. Психофизиология операторской деятельности. – СПб.: Речь, 2010.
3. Романов П. И. Физиология труда и стресса. – СПб.: Питер, 2014.
4. Щербатых Ю. В. Стресс и стрессоустойчивость человека. – М.: Эксмо, 2012.
5. Васильев В. П. Методы регистрации физиологических сигналов. – Минск: БГУ, 2015.
6. Троицкий А. В. Системы биологической обратной связи: инженерные решения и программная реализация. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016.
7. Лурия А. Р. Основы нейропсихологии. – М.: Академия, 2003. 384 с.
8. Судаков К. В. Системные механизмы саморегуляции функций организма. – М.: Медицина, 1999.
9. Тихонов В. Н., Колесников А. В. Фотоплетизмография: принципы, методы и приборы. – М.: Техносфера, 2018.
10. Webster J. G. Design of Pulse Oximeters. – Boca Raton: CRC Press, 1997. (инженерные основы фотоплетизмографических измерений)
11. Wearable Photoplethysmographic Sensors – Past and Present /T. Tamura [et al.] // Electronics. 2014. Vol. 3, Iss: 2, P. 282–302.
12. Соловьёв С. А. Аппаратные средства регистрации физиологических сигналов: основы проектирования. – М.: Радиотехника, 2020.
13. Баевский Р. М., Берсенева А. П. Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний. – М.: Медицина, 1997. 234 с.