

УДК 612.821

ВЕГЕТАТИВНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОГНИТИВНЫХ ФУНКЦИЙ В КОНТЕКСТЕ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

© 2014 г. *А.В. Бахчина*¹, *С.Б. Парин*¹, *М.М. Некрасова*², *Е.В. Рунова*², *С.А. Полевая*¹

¹Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

²Нижегородская государственная медицинская академия

nastyia18-90@mail.ru

Поступила в редакцию 27.09.2013

Актуализируется проблема исследования структуры связей между различными физиологическими модулями, реализующими работу функциональной системы. Предложена методика комплексного персонифицированного мониторинга функционального состояния в контексте деятельности в виртуальной реальности. Приведены результаты экспериментов синхронизированного измерения кардиоритма и внешнего виртуального контекста деятельности. Сделаны выводы о свойствах взаимодействия когнитивного и вегетативного модулей системы.

Ключевые слова: вегетативное обеспечение деятельности, вегетативная регуляция, когнитивные функции, вариабельность сердечного ритма.

Временная последовательность сенсорных сигналов активирует в памяти человека энграммы реальных событий с комплексом когнитивных, вегетативных, моторных и эмоциональных компонентов, обеспечивающих оптимизацию жизнедеятельности в реальной физической среде. Представляет интерес оценка структуры связей между двумя физиологическими модулями: когнитивным, реализующим преобразование внешних объективных сигналов во внутренние образы, и вегетативным, обеспечивающим оптимальным количеством ресурсов все, в том числе и когнитивные, процессы.

Ещё в XX в. отечественные физиологи (Быков, Бехтерев) убедительно демонстрировали наличие котиковисцеральных взаимодействий. Зарубежные исследователи также не оставляли без внимания данную тему, особенно разрабатывался вопрос о связи между параметрами когнитивной нагрузки и состояния человека [1–9], так как уже тогда актуальными являлись проблемы человеческого фактора в управлении сложными техническими системами и ошибок при принятии решений в короткие сроки или в нетривиальных ситуациях, контекстах. На данный момент продолжают комплексные исследования связи когнитивных, эмоциональных, вегетативных реакций [10–11]. Когнитивные нагрузки в исследованиях моделируют с помощью интеллектуальных задач (математические, логические задачи, задачи на память, задачи на внимание и др.), которые задействуют сложные когнитивные функции. Данные исследования, как правило, фиксируют глобальные изменения

состояния, не рассматривая структуру физиологических реакций внутри процесса решения задачи. Значительно меньше данных, представляющих быстрые физиологические реакции, связанные с когнитивной активностью.

В данной работе рассматривается связь между структурой поведенческой активности человека в виртуальной компьютерной среде и структурой вегетативных реакций в контексте закономерной и случайной динамики информационных образов. Принципиально важным является то, что в исследовании использовалась технология беспроводной регистрации кардиоритма, основанная на миниатюрных сенсорных платформах, что позволило непрерывно оценивать динамику вегетативной регуляции в масштабе по времени согласованном с динамикой внешних событий.

Методы

В экспериментах реализована технология комплексного мониторинга функционального состояния и событийного контекста в условиях естественной деятельности человека в виртуальной компьютерной среде [12], которая включает:

Беспроводная регистрация кардиоритма

Было организовано непрерывное измерение синхронизированных записей кардиосигналов и внешнего аудиовизуального контента в референтных группах испытуемых в условиях естественной деятельности.

Непрерывное измерение кардиосигнала производилось посредством телеметрической си-

стемы регистрации сердечного ритма. Данная система включает миниатюрный датчик ZephyrBioHarness, который крепится к эластичному поясу, в который вшиты два тканевых электрода. Пояс крепится на тело человека таким образом, чтобы электроды располагались в 1 и 2 грудных отведениях. Размер пояса устанавливается таким, чтобы испытуемому было комфортно и при этом различные движения не влияли на положение пояса.Packetная передача данных от датчика к мобильному устройству производится по беспроводному протоколу – BluetoothSPP 2.4ГГц. Пакеты данных передаются с интервалом 1 с. Каждый пакет содержит уникальный идентификатор устройства, 15 последних RR-интервалов, время относительно начала записи. Предельное расстояние передачи сигнала – 10 м до мобильного устройства. Реализация связи, передачи и сохранения данных производится на мобильном устройстве через специализированное программное обеспечение – «HR-Reader». Программная среда «HR-Reader» обеспечивает on-line визуализацию регистрируемой динамики RR-интервалов для контроля чистоты и целостности записи. Далее с мобильного устройства данные передаются по сети Интернет на сервер, где организована специализированная база данных, реализующая хранение, визуализацию и предобработку данных.

Для оценки уровня вегетативного обеспечения определялись следующие традиционные показатели variability сердечного ритма: частота сердечных сокращений (ЧСС), 1/с; общая мощность спектра (TP), мс²; мощность волн низкой частоты (LF), мс²; мощность волн высокой частоты (HF), мс²; коэффициент симпато-вагусного баланса, представляющий отношение мощности низкочастотного диапазона к мощности высокочастотного диапазона спектра variability сердечного ритма (LF/HF).

Кроме того, проводился анализ диапазона спектра ритмограммы от 0.6 до 4 Гц. Информативность этого диапазона для контроля функционального состояния убедительно доказана для контекста послеоперационного восстановления [13]. Исследования демонстрируют наличие сверхвысокочастотных компонентов (VHF – very high frequency) в структуре спектра variability сердечного ритма не только у больных, но и у здоровых людей. Мы предполагаем, что сверхвысокочастотные компоненты спектра отображают постоянную частоту собственных колебаний сердца и моды, связанные с системными регуляторными воздействиями. В работе использовались следующие показатели высоко-

частотного диапазона спектра ВСР: 1) частота колебаний с максимальной мощностью (ПЧ); 2) мощность данной частоты (МПЧ); 3) размах максимальной по мощности частоты: ПЧмин, ПЧмакс, ΔПЧ.

Фиксация внешнего аудиовизуального контекста

Под контекстом мы понимаем динамически развивающуюся совокупность событий внешней сенсорной среды, связанных с конкретной целевой функцией системы. Контекст фиксируется посредством видеомониторинга контента виртуальной реальности. Динамика информационных образов в виртуальной компьютерной среде регистрировалась через видеозапись монитора посредством программы DebutVideoCaptureofWare1.50. Фиксация соматомимических реакций человека, действующего в виртуальной реальности, производилась через видеозапись лица испытуемого веб-камерой.

Экспериментальное моделирование элементарных когнитивных нагрузок

На основе программно-аппаратного комплекса «HandTracker» разработан комплекс функциональных проб, обеспечивающих актуализацию первичных когнитивных функций и измерение ошибок моторного отображения элементарных сенсорных сигналов. Принципиальная схема данных проб такова, что испытуемый включается в состав человеко-компьютерной системы, в которой зрительные и звуковые стимулы генерируются компьютером и предъявляются испытуемому. Ориентируясь на свои ощущения, он должен в динамическом режиме управлять манипулятором-посредником (джойстик, мышь, клавиша) и воспроизводить предъявляемые экспериментатором стимулы с установленными параметрами [14]. Каждый эксперимент состоит из двух последовательных сессий: 1) обучающей (испытуемый знакомится с предстоящим заданием и пробует его выполнить несколько раз); 2) непосредственного измерения.

Эффективность когнитивной системы оценивалась по абсолютным и дифференциальным порогам распознавания базисных признаков звуковых и зрительных сигналов в виртуальной компьютерной среде.

Использовались следующие методики: измерение времени сенсомоторной реакции на звуковые стимулы; компьютерная кампиметрия (измерение дифференциальных порогов по оттенку); компьютерная латерометрия (измерение порогов пространственной локализации звукового образа); управление углом наклона отрезка; тест Струпа; тест «Часы с поворотом».

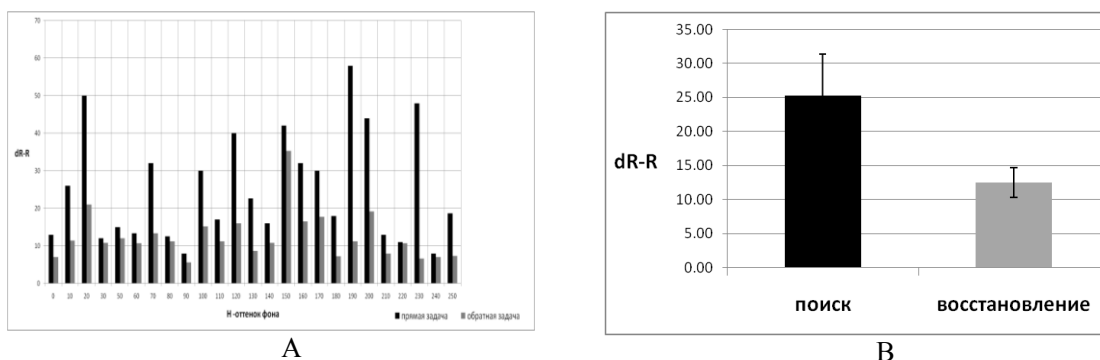


Рис. 1. Связь динамики R-R-интервалов и динамики информационных образов в среде компьютерной кампиметрии. А – R-R-дифференциал на фазах поиска и уничтожения информационного образа в каждой пробе; В – средний R-R-дифференциал на фазах поиска и уничтожения информационного образа

Оценка биологической активности информационных образов производилась в трех виртуальных контекстах (3 серии экспериментов) разной степени сложности: 1) элементарный информационный контекст; 2) сложный динамический информационный контекст; 3) моделирование элементарных когнитивных нагрузок. Массив данных для каждого испытуемого включал запись последовательности R-R интервалов, показатели компьютерных методик оценки когнитивных функций, видеозапись лица человека в различных информационных контекстах, видеозапись монитора, отображающую динамику информационных образов в виртуальной компьютерной среде. На основе треков видеонаблюдения были составлены индивидуальные хронограммы событий в виртуальной реальности.

В исследовании приняли участие 110 человек: 60 человек – студенты условно-здоровые (возраст 17–26 лет) – 1, 2, 3 экспериментальные серии; 50 человек – наркозависимые пациенты наркологической клиники (возраст 21–35 лет) – 3 экспериментальная серия. Гендерные особенности не исследовались.

Обсуждение результатов

Элементарный информационный контекст – стимульная и операционная среда компьютерной кампиметрии. Активность этой среды минимальна. Человеку предлагалось решать последовательность элементарных однотипных задач по обнаружению и обратному восстановлению/уничтожению целевого информационного образа в интерактивном режиме. Каждая задача включала два этапа. На первом этапе, на экране монитора появлялся однотонный цветовой квадрат (фон); задавалась цель – выделить на фоне пятно (стимул), идентифицировать его форму и выбрать из предложенного набора пиктограмму с изображением соответствующей

формы; если пиктограмма была выбрана правильно, то контрастирование пятна автоматически повышалось. На втором этапе задавалась цель – уничтожить пятно и вернуть цветовой квадрат в исходное однотонное состояние. Изменения контраста между фоном и пятном были строго монотонны, предсказуемы и осуществлялись только по команде человека: для увеличения контраста нажималась стрелка «вверх» столько раз, сколько необходимо для обнаружения информационного образа – проявления пятна на фоне; аналогично на втором этапе для уменьшения контраста нажималась стрелка «вниз». Каждое нажатие изменяло оттенок стимула относительно оттенка фона в рамках цветовой модели HLS. Задачи предьявлялись автоматически в случайном порядке, и человек оперировал информационными образами без регламентации временного режима. Такой контекст обеспечивает периодическую когнитивную нагрузку. Каждый период состоял из двух фаз: движение из неопределенности к информационному образу и движение в условиях полной определенности. Всего предлагалось решить последовательность из 25 задач, отличающихся только исходным оттенком фона. В данном контексте обнаружена прямая связь между уровнем неопределенности информационного образа и уровнем дезорганизации сердечного ритма ($dRR = \max R-R - \min R-R$) (Рис. 1). На фазе движения от полной неопределенности к целевому информационному образу при поиске пятна уровень дезорганизации сердечного ритма был достоверно выше, чем при решении обратной задачи по уничтожению пятна в ситуации полной определенности. Принимая во внимание, что полный период «обнаружение-уничтожение» составлял от 2 с до 15 с, встает вопрос о механизмах такой стремительной перенастройки сердечного ритма. Традиционные вегетативные и гуморальные механизмы регуляции имеют характерные периоды в диапазоне

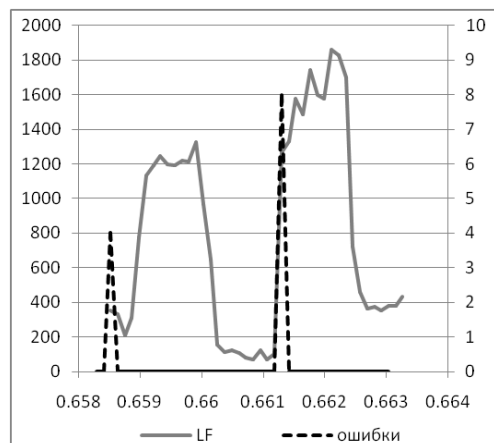


Рис. 2. Динамика симпатической регуляции (LF) в соответствии с динамикой ошибок управления

от 2.5 с до 60 с. Обнаруженные эффекты можно связать с активностью систем оперативного управления ритмом сердца (корковый контур регуляции), согласованным с уровнем неопределенности информационного образа.

Сложный динамический информационный контекст включал такие компьютерные игры, как гонки (прохождение одного круга гонок в игре Need for Speed Underground2) и тетрис. Информационные образы в игре обладали собственной динамикой. Человек управлял информационным образом в соответствии с целевой функцией, определенной правилами игры. События в игре, противоречащие целевой функции, фиксировались как ошибки управления. За ошибки при игре в «Тетрис» принимались явно неудачное расположение фигуры среди других, сопровождаемое вербальной или невербальной реакцией испытуемого на ошибку (вокализации – шипение, цоканье, стоны или слова, указыва-

ющие на раздражение). В игре «Гонки» ошибками считались столкновение с предметами игрового ландшафта (бордюры, столбы), столкновение с другими автомобилями и моменты, когда машина соперника обгоняла машину испытуемого. По треку видеонаблюдения за контентом для каждого человека составлялась временная диаграмма ошибок.

У большинства участников исследования в контексте компьютерных игр наблюдалось мобилизирующее действие рассогласований и ошибок управления информационными образами, проявляющееся в увеличении симпатической активации – резкое возрастание мощности колебаний в низкочастотном диапазоне (LF) (1 фаза стресса) (Рис. 2). Переход физиологической системы в высокоэнергетический режим поддерживает эффективность защитных реакций в экстремальных ситуациях, связанных с угрозой жизни. Симпатическая активация в данном контексте лишена биологической целесообразности и ведет к неоправданной редукции физиологической системы.

Динамика ВСР при проведении функциональных проб, обеспечивающих актуализацию первичных когнитивных функций и измерение ошибок моторного отображения элементарных сенсорных сигналов, исследовалась в двух группах испытуемых: здоровые, наркозависимые. Оценка результатов показала высокой степени пластичность параметров ВСР у здоровых испытуемых при изменении информационного контекста.

Дисперсионный анализ (линейные модели с повторными измерениями) показал значимые различия дисперсии ($p < 0.01$) параметров ВСР в контекстах разных проб (Рис. 3, 4). При этом в выборке наркозависимых параметры имеют меньшую степень изменений от пробы к пробе (Рис. 3, 4).

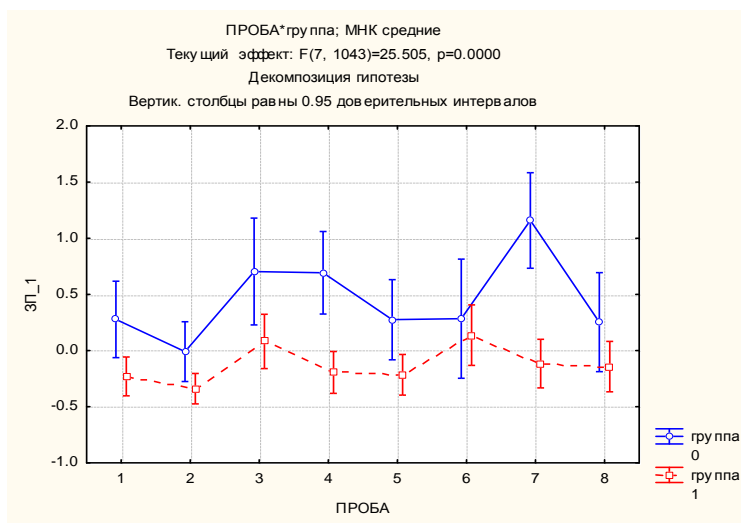


Рис. 3. Динамика параметров ВСР в 8 пробах в группах: 0 – здоровые, 1 – наркозависимые

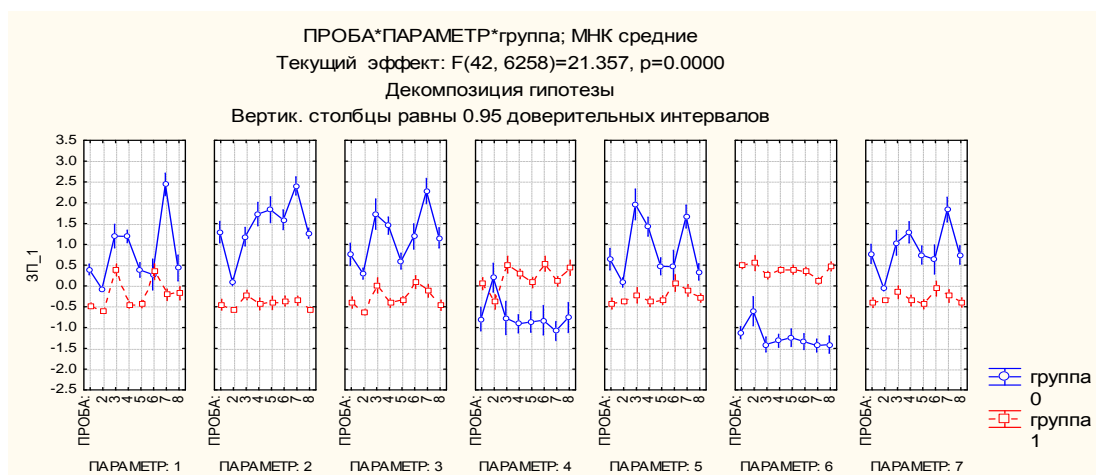


Рис. 4. Динамика параметров ВСП в разных пробах в группах: 0 – здоровые, 1 – наркозависимые. Параметр1 – LF (mc^2); Параметр2 – HF (mc^2); Параметр3 – TP (mc^2); Параметр4 – LF/HF; Параметр5 – мощность максимальной частоты в высокочастотном диапазоне; Параметр6 – максимальная частота в высокочастотном диапазоне; Параметр7 – сумма мощностей частот в высокочастотном диапазоне

Заключение

Таким образом, ситуации рассогласований и ошибок управления вызывают реакцию резкого всплеска симпатической активации в регуляции сердечного ритма.

В ситуации неопределённости уровень дезорганизации сердечного ритма (dR-R) достоверно выше по сравнению с ситуациями определенности. Это значит, что оперативное управление сердечным ритмом согласовано с уровнем неопределенности информационного образа.

Вегетативная регуляция сердечного ритма подстраивается в короткие сроки под изменения внешнего информационного контекста независимо от моторной активности человека. Важно подчеркнуть, что при разрушении регуляторной функции эндогенной опиоидной системы (ЭОС) (группа наркозависимых) дисперсия параметров ВСП значимо ниже, то есть система становится менее вариабельной и не меняет свои настойки при изменении внешнего информационного контекста. На основании этого можно предположить, что вегетативное обеспечение когнитивных функций обладает свойством адаптивности: режимы ВСП специфичны для характера когнитивной нагрузки. Подавление регуляторной функции ЭОС снижает адаптивность вегетативной регуляции.

Список литературы

1. Burger J.M., Arkin R. Prediction, control, and learned helplessness // *Journal of Personality and Social Psychology*. 1980. № 38. P. 482–491.

2. Burke W.P., Sundlof G., Walling B.G. Postural effects on muscle nerve sympathetic activity in man // *J. Physiol*. 1977. Vol. 272 № 2. P. 399–414.

3. Cohen S., Weinstein N. Nonauditory effects of noise on behavior and health // *Journal of Social Issues*. 1981. № 37. P. 36–70.

4. Larsson G. Personality, appraisal, and cognitive coping processes, and performance during various conditions of stress // *Military Psychology*. 1989. № 1. P. 167–182.

5. MacDonald R.R., Labuc S. Parachuting stress and performance. Farnborough, England: Army Personnel Research Establishment. 1982. 82 p.

6. Rachman S.J. Fear and courage among military bomb-disposal operators // [Special Issue] *Advances in Behaviour Research and Therapy*. 1983. № 4(3). P. 43–51.

7. Reid G.B., Colle H.A. Critical SWAT values for predicting operator overload // *Proceeding of the Human Factors Society 32nd annual meeting*. Santa Monica, CA: Human Factors Society, 1988. P. 1414–1418.

8. Rohrman S., Hennig J., Netter P. Changing psychobiological stress reactions by manipulating cognitive processes // *Int. J. of Psychophysiology*. 1999. № 33. P. 149–161.

9. Villoldo A., Tarno R.L. Measuring the performance of EOD equipment and operators under stress / *Technical Rep. № 270 – Indian Head, MD: Naval Explosive Ordnance Disposal Technical Center*, 1984. 128 p.

10. Staal M.A. Stress, Cognition and Human Performance: A Literature Review and Conceptual Framework / *Ames Research Center Moffett Field, California*, 2004. 177 p.

11. Джебраилова Т.Д., Коробейникова И.И., Дудник Е.Н., Каратыгин Н.А. Вегетативные корреляты индивидуальных временных параметров и результативности интеллектуальной деятельности человека // *Физиология человека*. 2013. Т. 39. № 1. С. 94–102.

12. Полевая С.А., Каратушина Д.И., Шемагина О.В., Бахчина А.В., Ковальчук А.В., Парин С.Б. Биологическая активность информационных образов в виртуальной компьютерной среде // Сборник научных трудов 15-й Всероссийской научно-технической конференции «Нейроинформатика 2013». Часть 1. М.: НИЯУ, 2013. С. 11–20.

13. Toledo E., Pinhas I., Aravot D., Akselrod S. Very high frequency oscillations in the heart rate and pressure

of heart transplant patient // *Med. Biol. Eng. Comput.* 2003. № 41. P. 432–438.

14. Антонец В.А., Полевая С.А., Казаков В.В. Hand-trecking. Исследование первичных когнитивных функций человека по их моторным проявлениям // Современная экспериментальная психология: в 2-х томах / Под. ред. В.А. Барабанщикова. М.: Институт психологии РАН, 2011. Т. 2. С. 39–55.

AUTONOMIC SUPPORT FOR COGNITIVE FUNCTIONS IN THE CONTEXT OF VIRTUAL REALITY

A.V. Bakhchina, S.B. Parin, M.M. Nekrasova, E.V. Runova, S.A. Polevaya

The problem of research of the structure of relations between various physiological modules that implement the work of a functional system is considered. We propose a method for comprehensive personalized monitoring of the functional state in the context of activities in virtual reality. The results of experiments involving synchronized measurements of heart rate and external virtual context of the activity are presented. Conclusions are made about the properties of the interaction between the cognitive and vegetative modules of the system.

Keywords: autonomic support of activities, autonomic regulation, cognitive functions, heart rate variability.

References

1. Burger J.M., Arkin R. Prediction, control, and learned helplessness // *Journal of Personality and Social Psychology*. 1980. № 38. P. 482–491.

2. Burke W.P., Sundlof G., Walling B.G. Postural effects on muscle nerve sympathetic activity in man // *J. Physiol.* 1977. Vol. 272 № 2. P. 399–414.

3. Cohen S., Weinstein N. Nonauditory effects of noise on behavior and health // *Journal of Social Issues*. 1981. № 37. P. 36–70.

4. Larsson G. Personality, appraisal, and cognitive coping processes, and performance during various conditions of stress // *Military Psychology*. 1989. № 1. P. 167–182.

5. MacDonald R.R., Labuc S. Parachuting stress and performance. Farnborough, England: Army Personnel Research Establishment. 1982. 82 p.

6. Rachman S.J. Fear and courage among military bomb-disposal operators // [Special Issue] *Advances in Behaviour Research and Therapy*. 1983. № 4(3). P. 43–51.

7. Reid G.B., Colle H.A. Critical SWAT values for predicting operator overload // *Proceeding of the Human Factors Society 32nd annual meeting*. Santa Monica, CA: Human Factors Society, 1988. P. 1414–1418.

8. Rohrman S., Hennig J., Netter P. Changing psychobiological stress reactions by manipulating cognitive processes // *Int. J. of Psychophysiology*. № 33. P. 149–161.

9. Villoldo A., Tarno R.L. Measuring the performance of EOD equipment and operators under stress /

Technical Rep. No. 270 – Indian Head, MD: Naval Explosive Ordnance Disposal Technical Center, 1984. 128 p.

10. Staal M.A. Stress, Cognition and Human Performance: A Literature Review and Conceptual Framework / Ames Research Center Moffett Field, California, 2004. 177 p.

11. Dzhebrailova T.D., Korobejnikova I.I., Dudnik E.N., Karatygin N.A. Vegetativnye korrelyaty individual'nyh razlichij vremennyh parametrov i rezul'tativnosti intellektual'noj dejatel'nosti cheloveka // *Fiziologija cheloveka*. 2013. Т. 39. № 1. S. 94–102.

12. Polevaja S.A., Karatushina D.I., Shemagina O.V., Bahchina A.V., Koval'chuk A.V., Parin S.B. Biologicheskaja aktivnost' informacionnyh obrazov v virtual'noj komp'yuternoj srede // *Sbornik nauchnyh trudov 15-j Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Nejroinformatika 2013»*. Chast' 1. М.: NIJaU, 2013. S. 11–20.

13. Toledo E., Pinhas I., Aravot D., Akselrod S. Very high frequency oscillations in the heart rate and pressure of heart transplant patient // *Med. Biol. Eng. Comput.* 2003. № 41. P. 432–438.

14. Antonec V.A., Polevaja S.A., Kazakov V.V. Hand-trecking. Issledovanie pervichnyh kognitivnyh funkcij cheloveka po ih motornym projavlenijam // *Sovremennaja jeksperimental'naja psihologija: v 2-h tomah* / Pod. red. V.A. Barabanshnikova. М.: Institut psihologii RAN, 2011. Т. 2. S. 39–55.