

## ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ СЕРДЕЧНОГО РИТМА ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ ВИДЕООКУЛОГРАФИЧЕСКИМ ИНТЕРФЕЙСОМ В ПРОЦЕССЕ ОБУЧЕНИЯ УПРАВЛЕНИЕМ САМОХОДНЫМ ШАССИ

Я. А. Туровский, А. В. Алексеев

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»  
Поступила в редакцию 18.07.2016 г.

**Аннотация.** На основе анализа variability сердечного ритма (ВСР) проведено исследование вегетативного обеспечения операторской деятельности. Здоровые добровольцы с использованием видеоокулографического интерфейса управляли самоходным шасси, получая информацию о его маневрах по видеоканалу. Продемонстрированы особенности изменения спектральных компонентов и нестационарных компонентов ВСР: наблюдается снижение в исследуемых диапазонах (HF, LF) роли нестационарных фрагментов в формировании картины ВСР, при сохранении параметров стационарных (тонических) фрагментов. Выявлены типы изменения параметров нестационарных фрагментов ВСР: кластерный анализ показателей времени, в течение которого детектировались нестационарные фрагменты сигнала, продемонстрировал наличие значимо различающихся состояний для контрольной группы, первого и второго заездов и отсутствие различий в третьем.

**Ключевые слова:** человеко-машинный интерфейс, variability сердечного ритма, эргатические системы

**Abstract.** Based on the analysis of heart rate variability (HRV), a study of autonomic provision of operator activity. Healthy volunteers using eye-tracking interface controlled self-propelled chassis, obtain information on the video channel. Demonstrate features of changes in the spectral components and transient components of HRV: a decrease in the test range (HF, LF) non-stationary fragments role in the formation of the HRV pattern, while maintaining the parameters of stationary (tonic) fragments. Revealed the types of changes in the parameters of non-stationary fragments HRV: a cluster analysis of the indicators of time during which the detected signal is non-stationary fragments demonstrated the existence of significantly different conditions for the control group, the first and second rounds, and no difference in the third.

**Keywords:** human-machine interface (HMI), heart rate variability, ergatic system

Одним из направлений развития физиологии операторской деятельности является разработка и изучение новых видов интерфейсов человек-компьютер, расширяющих возможности взаимной передачи команд. Традиционно, такие интерфейсы относятся к т.н. альтернативным человеко-машинным (человеко-компьютерным) интерфейсам, подразумевая, что их функционирование отличается от традиционных интерфейсов: клавиатуры, джойстика, мыши. Качество работы подобных интерфейсов оценивается в виде показателей скорости и точности передачи команд на устройство-эффектор, т.е. устройство, непосредственно

выполняющее те или иные действия по команде пользователя. Однако при таком подходе не учитывается важное свойство эргатических систем – особенности адаптации человека в ходе взаимодействия программно-аппаратной части комплекса и оператора [1–3]. Очевидно, что в ходе управления оператор, в общем случае, работает в состоянии дефицита информации и, довольно, часто, времени. Подобная деятельность приводит к состоянию стресса [4]. При этом, чем менее интерфейс адаптирован и удобен в плане эргономики для оператора, тем более сильное психофизиологическое напряжение испытывает пользователь. Аналогичная ситуация складывается и в том случае, если пользователь, даже используя эффек-

тивный и эргономичный интерфейс, не обладает достаточными навыками управления. При этом по мере овладения навыком, уровень функционального напряжения будет снижаться [1–4].

Таким образом, для оценки эффективности работы альтернативных интерфейсов человек-компьютер перспективным представляется не только оценка скорости и точности их работы, но и оценка состояния пользователя при работе с ними. Одним из таких интерфейсов является т.н. окулографический интерфейс, т.е. программно-аппаратные решения, обеспечивающие управление устройствами изменением паттерна движения глаза [5–7]. В качестве метода оценки психофизиологического напряжения пользователя оптимальным является метод оценки variability сердечного ритма, имеющий значительный теоретический и практический задел в области анализа вегетативного статуса человека [8–10].

Целью исследования является оценка вегетативного обеспечения пользователей в ходе обучения ими применению видеоокулографического интерфейса для управления самоходным шасси.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В силу простоты и удобства использования для испытуемого, выбор интерфейса был сделан в пользу видеоокулографической системы. Для этого была разработана оригинальная информационная система, позволяющая на основе стандартной видеокамеры с извлеченным инфракрасным (ИК) фильтром получить более четкое по сравнению с камерой с оставленным ИК фильтром изображение области глаза. Для ИК камеры был изготовлен специальный держатель, который крепится на голове и предоставляет возможность изменения положения камеры, что позволяет осуществлять настройку изображения, поступающего с камеры, не зависимо от формы головы пользователя, удовлетворить требованиям удобства испытуемого, а также расположить камеру так, чтобы она не закрывала обзор. Программный пакет, разработанный для этого интерфейса, использует фильтрацию изображения и, учитывая уровень освещенности участка глаза, выбирает метод детектирования зрачка – «яркий» или «темный». Такой метод дополнен системой подавления шума, который появляется из-за различных факторов (например, из-за вспышки света) и может помешать правильной обработке изображения глаза. Этот программный пакет также регулирует степень чувствительности ИК камеры к свету в зависимости от освещенности объекта.

В ходе проведенного эксперимента испытуемые добровольцы, от которых было получено информированное согласие на участие в эксперименте, располагались перед экранами мониторов (мониторы LCD, 27") на удобном для них расстоянии. На мониторы транслировалось изображение с видеокамеры, установленной на самоходном шасси и направленной вперед по направлению движения. Угол обзора камеры на шасси составлял  $54^\circ$  по горизонтали и  $40^\circ$  по вертикали. Другая видеокамера, фиксирующая положение зрачка, располагалась над глазом и смотрела на него, при этом учитывалось пожелание испытуемого по размещению этой камеры для обеспечения удобства ее использования.

Схема работы рассматриваемого интерфейса имеет двунаправленный поток информации: испытуемый подаёт на самоходное шасси команды управления, одновременно контролируя по изображению на экране положение устройства относительно препятствий и границ полигона. При этом положение зрачка правее «нейтральной» области задаваемой при калибровке и левее соответствующей области вызывали поворот шасси в соответствующую сторону, движение вверх – перемещение шасси вперёд, вниз – назад. Самоходному шасси, управляемому испытуемым, необходимо объехать два препятствия, не задев ни одного из них, совершив манёвр в виде цифры «8». Испытуемый мог подавать команды «вперёд», «назад», «вправо», «влево» или «нейтраль» (когда самоходное шасси не двигалось с места, не выполняло каких-либо манёвров). В качестве препятствий движению использовались пластиковые цилиндры высотой 25 см, хорошо визуализируемые видеокамерой самоходного шасси. Начальный поворот вправо или влево испытуемый выбирал самостоятельно, без каких-либо инструкций. Вернувшись на исходную позицию, ему необходимо было остановиться и развернуть самоходное шасси на  $180^\circ$ , т.е. вернуть его в то же положение, с которого начинался эксперимент.

Таким образом, в настоящей работе реализована достаточно простая схема управления самоходным шасси с использованием окулографического интерфейса, обеспечивающая, тем не менее, работу дискретного канала передачи команд. Всю информацию о движении самоходного шасси испытуемый получал только с видеокамеры, расположенной непосредственно на шасси, при этом оптическая ось видеокамеры была параллельна диаметральной плоскости шасси.

При проведении эксперимента испытуемому отводилось 3 минуты на один заезд. Каждый испытуемый осуществлял 3 заезда. Если он не успевал выполнить задания заезда в установленное время, то считалось, что исход заезда неудачен. Помимо требования выполнения временного лимита, нельзя было задеть при движении ни один из цилиндров, обозначивших трассу движения. В случае если испытуемый всё же задевал хотя бы один цилиндр, но при этом укладывался во временной лимит, считалось, что заезд завершен успешно, но со «штрафом». В проведенных экспериментах приняло участие 32 добровольца – 30 юношей и 2 девушки в возрасте от 19 до 23 лет, их медианный возраст составил 20 лет. Испытуемые не имели неврологической и психиатрической патологии, не принимали лекарств, влияющих на координацию движений и скорость принятия решения. Все испытуемые были правшами. Перед исследованием испытуемые проходили тестирование на темперамент по методике Айзенка и ситуационную и личностную тревожность.

Для оценки вегетативного статуса испытуемых использовался метод анализа вариабельности сердечного ритма (ВСР). В ходе управления шасси регистрировалась последовательность RR-интервалов, зарегистрированная прибором «Полиспектр-12» ООО «Нейрософт». Регистрация осуществлялась в I отведении при частоте в дискретизации 1 кГц. Помимо этого последовательность RR-интервалов регистрировалась и в состоянии относительного покоя испытуемого до процесса управления самоходным шасси. Длительность записи в состоянии относительного покоя составляет не менее 600 кардиоциклов, тем временем как в ходе управления длительность записи лимитировалась временем, затраченным испытуемым на выполнение задания. Анализировались параметры среднего значения RR-интервала, значения спектральной плотности мощности (СПМ), полученные на основе преобразования Фурье в стандартных частотных диапазонах, результаты вейвлет-преобразования исходного сигнала в стандартных диапазонах, позволяющих выделить тонические и нестационарные элементы на кривой ВСР [11].

В статистическом анализе полученных результатов использовались методы дескриптивной статистики, а, учитывая, что распределения большинства показателей не являются нормальными, применялись критерии непараметрической статистики: критерии Крускайла-Уоллеса,

Манна-Уитни, Фридмана и Вилкоксона для парных случаев [12, 13], при этом параметр  $\alpha$  принимался равным 5%. Для анализа категориальных переменных использовался критерий  $\chi^2$  и точный критерий Фишера. Для выявления индивидуальных и групповых особенностей исследуемых показателей применялся кластерный анализ (метод К-средних). Учитывался эффект множественных сравнений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам анализа параметров вариабельности сердечного ритма (табл. 1) видно, что при проведении заездов, по отношению к состоянию относительного покоя наблюдается снижение амплитуды волн исследуемых частотных диапазонов ВСР, что проявляется снижением спектральной плотности мощности, при этом средние значения ЧСС значимых изменений не претерпели. Исследование параметров ВСР с использованием оригинальных алгоритмов на основе вейвлет-преобразования продемонстрировали различные реакции двух компонентов (тонические и нестационарные фрагменты), формирующих каждый из исследованных частотных диапазонов [14–16].

Мода значений коэффициентов вейвлет-преобразования  $W^2(a,b)$  отражающая значения наиболее постоянных частотно-временных паттернов на кривой ВСР, изменений не претерпела ни в LF, ни в HF диапазонах, что можно интерпретировать, как сохранение тонических регуляторных влияний. В то же время наблюдается снижение в обоих исследуемых диапазонах показателя  $\sigma$  ( $W^2(a,b)$ ), что отражает уменьшение роли нестационарных фрагментов в формировании картины ВСР. Детально этот вывод подтвержден показателями «время нестационарных фрагментов» и «мощность нестационарных фрагментов». Первый из них показывает число кардиоциклов в течение которых были детектированы нестационарные фрагменты ВСР; второй – суммарную выраженность означенных фрагментов в общей структуре ВСР. Снижение обеих из этих показателей, на фоне не изменившихся значений моды  $W^2(a,b)$  в обоих частотных диапазонах демонстрирует уменьшение доли активных регуляторных воздействий в ходе осуществляемого заезда, на фоне сохранённых тонических влияний.

Исходя из этого подхода, следует вывод, что в ходе управления самоходным шасси с использованием видеоокулографического интерфейса происходит изменение структуры ВСР, в целом от-

ражающее функциональное напряжение, однако, снижение числа нестационарных фрагментов, демонстрирующих активные регуляторные влияния указывает, что существующее функциональное напряжение не является для пользователей достаточно сильным. В противном случае наблюдались бы попытки регуляторных систем осуществлять активные воздействия для поддержания гомеостаза, что выразилось бы в значительном росте мощности нестационарных фрагментов ВСР.

Корреляционный анализ, в котором оценивались связи показателей вариационной пульсометрии и результаты психологических тестов (ситуационная и личностная тревожность, темперамент по Айзенку) показали связь «шкалы лжи» теста Айзенка и абсолютных значений LF компоненты спектра и тонических значений HF спектра при проведении второго заезда ( $r=0.35$  в обоих случаях,  $p<0.05$ ).

Помимо абсолютных значений параметров ВСР в частотных областях HF и LF диапазона исследовались и их относительные значения.

Различия в отношениях СПМ ( $p<0.05$ , критерий Вилкоксона для парных случаев) удалось установить только между контрольными значениями и данными полученными при первом заезде. В остальных заездах показатели не отличались от таковых в контроле. Очевидно, первый заезд, в котором использовалось неизвестное ранее устройство и способ управления, был намного более сильным фактором, отклоняющим исходное вегетативное равновесие испытуемого, чем следующие заезды.

Отношение модальных значений показателя ( $W^2(a,b)$ ), отражающего тонические регуляторные влияния на ВСР изменений не претерпели, равно

как и не изменились значения  $\sigma (W^2(a,b))$ , отражающие изменчивость регуляторных влияний.

Отношение LF/HF для времени в течение которого идентифицировались нестационарные фрагменты ВСР для 2-го и 3-го заезда было существенно ниже ( $p<0.01$ ), чем в контроле, не отличаясь для первого заезда. Иными словами, от заезда к заезду наблюдался рост активности в HF диапазоне по отношению к исходному состоянию.

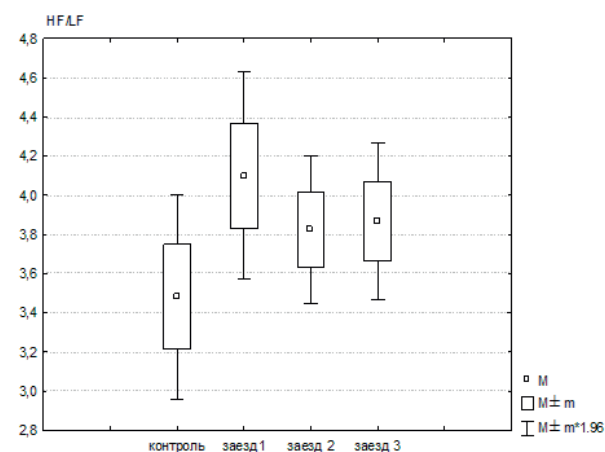


Рис. 1. Динамика отношения СПМ HF/LF в ходе экспериментов.

Динамика отношения суммарной мощности нестационарных фрагментов отражала их снижение их выраженности в LF компонентах в ходе первого заезда. Для последующих заездов отличий выявлено не было, что отражает восстановление баланса HF и LF регуляторных влияний.

Для выявления индивидуальных особенностей реакции ВСР пользователя на управление самоходным шасси был проведен кластерный анализ показателей времени, в течение которого

Таблица 1.

Результаты анализа кардиоинтервалограммы при заездах с использованием видеоокулографического интерфейса ( $M\pm m$ ).

	Контроль	1-й заезд	2-й заезд	3-й заезд
Среднее RR-интервала (мс)	703±17	685±25	683±22	692±19
СПМ LF(мс <sup>2</sup> )	32836±14310	18455±1879***	18006±1769***	18380±1765***
СПМ HF(мс <sup>2</sup> )	108127±8377	71010±8588***	65599±7368***	67516±7512***
Мода $W^2(a,b)$ (мс <sup>2</sup> ) HF	1908±496	2287±706	1340±289	2763±766
$\sigma (W^2(a,b))$ (мс <sup>2</sup> ) HF	6493±1229	4895±1532*	3863±1329**	4332±1324***
Время нестационарных фрагментов(кардиоциклов) HF	97±8	23±2***	22±1***	21±2***
Мощность нестационарных фрагментов(мс <sup>2</sup> ) HF	717199±128549	122086±43957***	104405±43010***	82834±24138***
Мода $W^2(a,b)$ (мс <sup>2</sup> ) LF	45695±8524	55732±13492	44409±7797	56676±12467
$\sigma (W^2(a,b))$ (мс <sup>2</sup> ) LF	82133±12118	62963±24706***	55558±17149***	47131±7979***
Время нестационарных фрагментов (кардиоциклов) LF	137±9	25±3***	20±3***	19±2***
Мощность нестационарных фрагментов (мс <sup>2</sup> ) LF	11081190±1548314	1801458±844692***	1364992±503400***	885143±199753***

\*  $p<0.05$ , \*  $p<0.01$ , \*\*\*  $p<0.005$  (критерий Вилкоксона для парных случаев).

детектировались нестационарные фрагменты сигнала. Данный показатель был выбран в первую очередь как отражающий суммарное время в ходе которого осуществлялось активное изменение регуляторными системами параметров ВСП. Данные были приведены к нулевому среднему и единичной  $\sigma$ , результаты представлены на рис. 4.

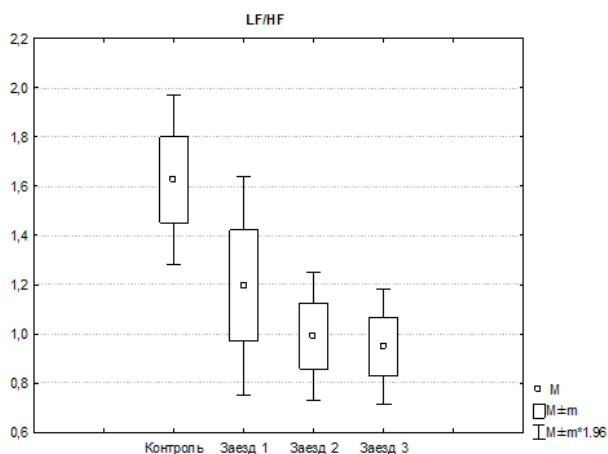


Рис. 2. Отношение времени существования нестационарных фрагментов ВСП в LF и HF диапазонах.

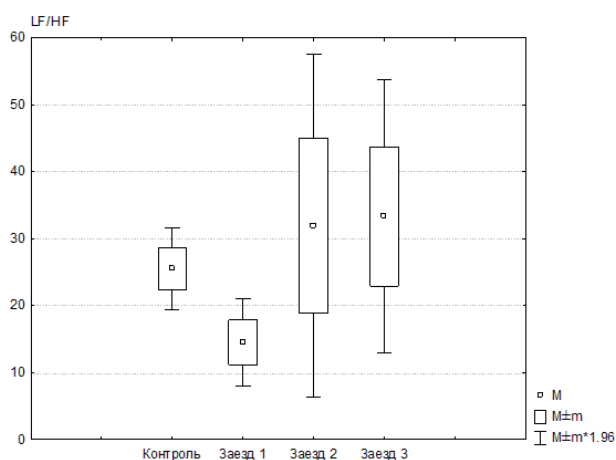


Рис. 3. Отношение мощности нестационарных фрагментов в ВСП в LF и HF диапазонах

Из рис. 4 видно, что разделение на три кластера (15, 8, 9 испытуемых соответственно) продемонстрировало наличие значительно различающихся состояний для контрольной группы ( $p < 0.001$ ), первого и второго заездов ( $p < 0.01$ ) и отсутствие различий в третьем. Для первого кластера характерно снижение в ходе заездов, по сравнению с контролем, времени, в течение которого в картине ВСП присутствовали нестационарные фрагменты, отражающие активные регуляторные влияния.

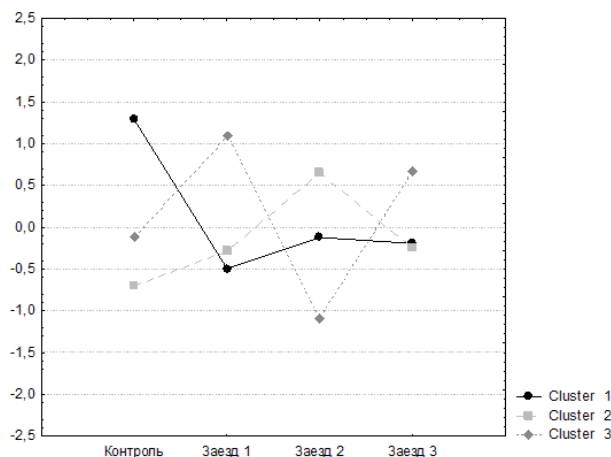


Рис. 4. Результаты кластерного анализа показателя «время нестационарных фрагментов» в контроле и при выполнении заездов самоходного шасси управляемого видеоокулографическим интерфейсом. Данные приведены к нулевому среднему и единичной  $\sigma$

Этот факт можно интерпретировать как нахождение нового, адаптированного для текущей работы, состояния регуляции ВСП. Для второго – характерна разнонаправленная динамика от заезда к заезду, отражающая, вероятно, недостаточно успешную адаптацию вегетативной регуляции к условиям работы с окулографическим интерфейсом. Третий вариант, в противоположности выборочным средним отражает увеличение суммарного времени нестационарных фрагментов в картине ВСП. Подобная динамика, в рамках подходов к оценке нестационарных фрагментов ВСП, как о временных отрезках, в которых осуществляются активные регуляторные воздействия на те, или иные физиологические системы, может оговорить о повышенном функциональном напряжении испытуемых данного кластера.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена оценка, на основе анализа вариабельности сердечного ритма, функционального напряжения пользователя в ходе управления им самоходным шасси с использованием видеоокулографического интерфейса. По результатам анализа параметров ВСП показано снижение спектральной плотности мощности в HF и LF диапазонах. Мода значений коэффициентов вейвлет-преобразования  $W^2(a,b)$ , отражающая значения наиболее постоянных частотно-временных паттернов на кривой ВСП, изменений не претерпела ни в одном из исследуемых диапазонов. В то же время наблюдается снижение в обоих исследуемых диа-

пазонах роли нестационарных фрагментов в формировании картины ВСР. Различия в отношениях СПМ для исследуемых частотных диапазонов удалось установить только между контрольными значениями и данными, полученными при первом заезде. Отношение LF/HF для времени, в течение которого идентифицировались нестационарные фрагменты ВСР для 2-го и 3-го заезда, было существенно ниже, чем в контроле, не отличаясь для первого заезда. Динамика отношения суммарной мощности нестационарных фрагментов отражала их снижение их выраженности в LF компонентах в ходе первого заезда. Для последующих заездов отличий выявлено не было, что отражает восстановление баланса HF и LF регуляторных влияний. Кластерный анализ показателей времени, в течение которого детектировались нестационарные фрагменты сигнала, продемонстрировал наличие значимо различающихся состояний для контрольной группы, первого и второго заездов и отсутствие различий в третьем. Таким образом, продемонстрировано изменение параметров вегетативной регуляции ВСР при использовании одно из видов интерфейса человек-компьютер: видеоокулографического интерфейса. Подобный подход, основанный как на стандартных подходах в анализе ВСР, так и на оригинальных алгоритмах, позволяет определить степень функционального напряжения пользователя при работе не только с окулографическими, но и с большой группой интерфейсов человек-компьютер, что расширит возможности для конструирования интуитивно понятных в управлении и эргономичных устройств.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 16-29-08342-офи\_м)*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Венда В.Ф. Инженерная психология и синтез систем отображения информации / В.Ф.Венда. — М.: Машиностроение, 1975. — 400 с.
2. Венда В.Ф. Инженерная психология в оценке и проектировании информационной техники («юзабилити»): Российские приоритеты/ В.Ф. Венда, В.Ю. Венда, Л.А. Пашук // Психологический журнал. — 2013. — №2 — С. 129-139.
3. Чернецкая Е.Д. Человек-оператор как ответственный субъект деятельности в эргатических системах/ Е.Д.Чернецкая, Н.В. Воскресенская // ВВ: Психология и психотехника. — 2013. — №8. — С. 102-120. DOI: 10.7256/2306-0425.2013.8.10613.
4. Бодров В.А., Информационный стресс в операторской деятельности / В.А.Бодров, А.А.Обознов, П.С. Турзин //Психологический журнал. — 1998. — №5. — С. 38-54
5. Славуцкая М.В. Внимание и движения глаз. Строение глазодвигательной системы, феноменология и программирование саккады/ Славуцкая М.В., Моисеева В.В., Шульговский В.В.// Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. — 2008. — № 1. — С. 28-45.
6. Программа для ЭВМ Eye\_Purpose\_V1№ 2014660844/ Я.А.Туровский, А.В. Алексеев, Е.В.Киселёва О.С.Стогний. — Зарегистрирован 16 октября 2014 года в реестре программ для ЭВМ
7. Программа для ЭВМ Я.А. GLAZDVIG 1.0 № 2014614928 / Туровский, А.В.Алексеев, Е.В.Киселёва, Т.В.Шапошникова. — Зарегистрирован 14 мая 2014 года в реестре программ для ЭВМ
8. Бабунц И.В. Азбука анализа variability сердечного ритма/ И. В. Бабунц, Э. М. Мириджанян, Ю. А. Машаех. — Саврополь, 2002. — 109с.
9. Баевский Р.М. Анализ variability сердечного ритма в космической медицине / Р.М. Баевский //Физиология человека. — Т.28. — № 2. — С. 70-82.
10. Баевский Р.М. Возрастные особенности сердечного ритма у лиц с разной степенью адаптации к условиям окружающей среды / Р.М. Баевский, А.П. Баринаева, Ж.В. Барсукова //Физиология человека. — 1985. — Т.11, №2. — С. 208-212.
11. Туровский Я.А. Вегетативная регуляция сердечно-сосудистой системы плодов и новорожденных детей, перенесших хроническую внутриутробную гипоксию: автореф. дис.. канд. мед. наук/Я.А. Туровский. — Воронеж, 2005. —24 с.
12. Гланц С. Медико-биологическая статистика. / С. Гланц. — М., Практика, 1998. — 459 с.
13. Рунион Р. Справочник по непараметрической статистике. Современный подход. Перевод с англ. Е.З. Демиденко./ Р.Рунион. — М., Финансы и статистика. 1982. — 198 с.
14. Пат. 2241374 Российская Федерация, Способ исследования variability сердечного ритма у детей / Туровский Я.А., Битюцкая Л.А., Кузнецова И.Г., Мишин В.В.
15. Пат. 2326587 Российская Федерация, Способ исследования variability сердечного ритма человека/ Туровский Я.А.
16. Туровский Я.А. Динамика цепочек локальных максимумов спектров электроэнцефалограмм человека/ Я.А. Туровский, С.Д.Кургалин, А.Г.Семенов //Биофизика. — 2014. — Т. 59, № 1. — С. 185-190.

*Туровский Я. А., Алексеев А. В.*

*Воронежский государственный университет  
Туровский Я. А., доц., зав. лаб. медицинской ки-  
бернетики ФКН*

*E-mail: yaroslav\_turivsk@mail.ru  
Тел.: +7 904 213-82-95*

*Алексеев А. В., магистрант ФКН, техник ла-  
боратории медицинской кибернетики ФКН*

*Voronezh State University  
Turovsky Ya. A. Assoc., Head of Laboratory  
Medical Cybernetics CSF*

*E-mail: yaroslav\_turivsk@mail.ru  
Ph.: +7 904 213-82-95*

*Alekseev A.V., CSF undergraduate technician  
Medical Cybernetics CSF MAD lab .*