

УДК 612.204.1

ОЦЕНКА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ УЛЬТРАСТАБИЛЬНЫХ СИСТЕМ

В.Н. Ильин, М.М. Филиппов, А. Алвани

Национальный университет физического воспитания и спорта Украины, г. Киев, Украина

Предлагается новый подход к оценке и прогнозированию изменений функционального состояния организма человека в экстремальных условиях. В основе подхода лежит положение о том, что организм человека представляет собой ультрастабильную систему, которая может находиться только в дискретных состояниях. При внешних воздействиях или спонтанно переход между состояниями происходит скачкообразно по определенным правилам. Эти состояния и правила перехода можно классифицировать и описать с помощью спектральных формул и индексов, волновых чисел и комплекса математико-статистических показателей ритма сердца или любого другого периодического процесса в организме.

Ключевые слова: функциональное состояние, ультрастабильная система, ритм сердца, спектральная формула, экстремальные условия.

В настоящее время для интегральной оценки функционального состояния организма человека широко применяется математический анализ ритма сердца [4, 5, 11]. Разработан ряд критериев, позволяющих характеризовать состояние системы управления функциями в целостном организме, дифференцированно оценивать активность и степень напряжения отдельных контуров (центрального и автономного) и каналов (нервного, гуморального) регуляции. Однако существующий методологический подход к анализу ритма сердца имеет ряд существенных недостатков и ограничений. Отмечаются значительные различия в интерпретации математического анализа ритма сердца [1, 4, 6]. Недостаточно изучены корреляции с конкретными функциями организма, нерешенным остается вопрос о диапазоне нормы и критериях патологических сдвигов. Велика индивидуальная вариативность математико-статистических характеристик ритма сердца, которая значительно превосходит вариабельность физиологических показателей. В связи с этим в процессе возникновения экстремальных ситуаций, при определении состояний перенапряжения и переутомления, наличия патологических отклонений существующие математико-статистические подходы мо-

гут обладать недостаточной прогностической ценностью.

Целью настоящего исследования является обоснование для оценки функционального состояния организма человека разработанного методического подхода, основанного на теории ультрастабильных систем.

Предлагаемый подход базируется на традиционных представлениях о регуляторных системах организма и положении о том, что организм человека представляет собой ультрастабильную систему [2], которая может находиться только в дискретных состояниях. При внешних воздействиях переход между состояниями происходит скачкообразно по определенным правилам. Эти состояния и правила перехода можно классифицировать и описать с помощью спектральных формул и индексов, волновых чисел и комплекса математико-статистических показателей ритма сердца или любого другого периодического процесса в организме.

Предполагается, что в организме существуют регуляторные системы, сохраняющие его ультрастабильность. Для живого организма как ультрастабильной системы характерно то, что при частых небольших внешних воздействиях изменения его существенных переменных не выходят за физиологические

пределы [9]. В результате организм находится в одном из равновесных или стабильных состояний. При экстремальных воздействиях, выводящих организм из состояния равновесия (стабильности), он за счет изменений определенных параметров переходит в новое стабильное состояние. При этом изменения в организме как в ультрастабильной системе будут адаптивны, если существенные переменные удерживаются в физиологических пределах. Эти переходы инвариантны, происходят по определенным правилам, ограничены во времени, могут содержать несколько квазистационарных или переходных состояний и описываться ступенчатыми функциями. При этом характер любого периодического процесса в организме отражает текущее состояние организма и его регуляторных систем [4, 6].

Известно, что сокращения сердца представляют собой периодический процесс, характеристики которого зависят от функционального состояния всего организма и отдельных звеньев регуляторной системы: нервного, гуморального, самого сердца (автономного) [1, 2, 7]. Его изменения – универсальная оперативная реакция целостного организма как ультрастабильной системы в ответ на любое воздействие внешней среды. При этом математико-статистические характеристики ритма сердца являются такими переменными, изменения которых удерживаются в физиологических пределах. Спектральные характеристики ритма сердца рассматриваются в качестве параметров, меняющих ступенчато свои величины при переходе организма в новое стабильное функциональное состояние.

Для классификации состояний регуляторных систем и формализации правил перехода между основными состояниями организма мы предлагаем осуществлять описание периодических составляющих сердечного ритма в виде спектральных формул и индексов, волновых чисел, амплитудных и частотных характеристик.

Так, частотный диапазон изменений основных периодических составляющих ритма сердца условно можно разделить на три широко перекрывающиеся между собой обла-

сти: низких, средних и высоких частот. В символической форме низкочастотная компонента обозначается Sm , среднечастотная – Sb , высокочастотная – Sf . Низко-, средне- и высокочастотные области могут содержать отдельные компоненты Sm_i , Sb_j и Sf_k , количество которых (i, j, k), а также их амплитудные (Am_i , Ab_j и Af_k) и частотные (fm_i , fb_j и ff_k) характеристики зависят от состояния регуляторных систем и всего организма в целом.

В связи с этим спектральная формула представляет собой последовательность символов, описывающую характеристики спектральных линий в спектре анализируемого ряда кардиоинтервалов. Например, если в спектре интервалокардиограммы отсутствуют максимумы (спектральные линии), то в символической форме ее можно записать как So . Если максимумы наблюдаются только в одной из частотных областей, то такие спектры можно представить соответственно в виде Sm , Sb . Спектры, в которых присутствуют максимумы только в высокочастотной области, обозначаются $SoSf$. Если имеются максимумы в двух из трех частотных областей, то такие спектры записываются в следующем виде: $SmSb$, $SmSf$, $SbSm$, $SbSf$. В этом случае первой записывается компонента, имеющая наибольшую амплитуду. Трехкомпонентные спектры записываются в виде $SmSbSf$, $SmSfSb$, $SbSmSf$, $SbSfSm$, $SfSm$, $SfSb$, $SfSmSb$ и $SfSbSm$. Если спектр содержит n компонентов, то его формула будет состоять из последовательности n символов в порядке убывающей амплитуды.

Стабильными или равновесными состояниями будут определяться те, у которых спектры кардиоритмограмм описываются следующими формулами: So , Sm , Sb , $SmSb$, $SbSm$. Это будет означать, что процессы расхода и накопления энергии уравновешены.

Квазистационарные состояния имеют спектры с формулами Sf , $SmSf$, $SbSf$, $SfSm$, $SfSb$, $SmSbSf$, $SmSfSb$, $SbSmSf$, $SbSfSm$, $SfSmSb$, $SfSbSm$. Это значит, что в организме происходит накопление или расход энергии. При достижении их определенного уровня организм переходит в новое состояние, основным признаком которого является наличие в спектрах кардиоинтервалограмм высо-

кочастотного компонента Sf. Предполагается, что они отражают активизацию в организме ступенчатых механизмов выведения из равновесного состояния. Одним из таких ступенчатых механизмов может быть активность нервных структур (корковых и подкорковых), которые являются системами быстрого реагирования.

Стационарные состояния со спектрами Sm, Sb, SmSb и SbSm и квазистационарные состояния со спектрами SmSf, SbSf, SmSbSf и SbSmSf являются сопряженными, входящими

в основные (регулярные) кластеры. Организм может находиться в таких состояниях длительное время. Состояния со спектрами Sf, SfSm, SfSb, SmSfSb, SbSfSm, SfSmSb, SfSbSm описываются показателями, входящими в нерегулярные и аномальные кластеры, и время нахождения в этих состояниях организма ограничено. При внешних воздействиях слабой или средней интенсивности в начале изменяются амплитудные характеристики спектра ритма сердца (рис. 1). При этом спектральная формула не изменяется.

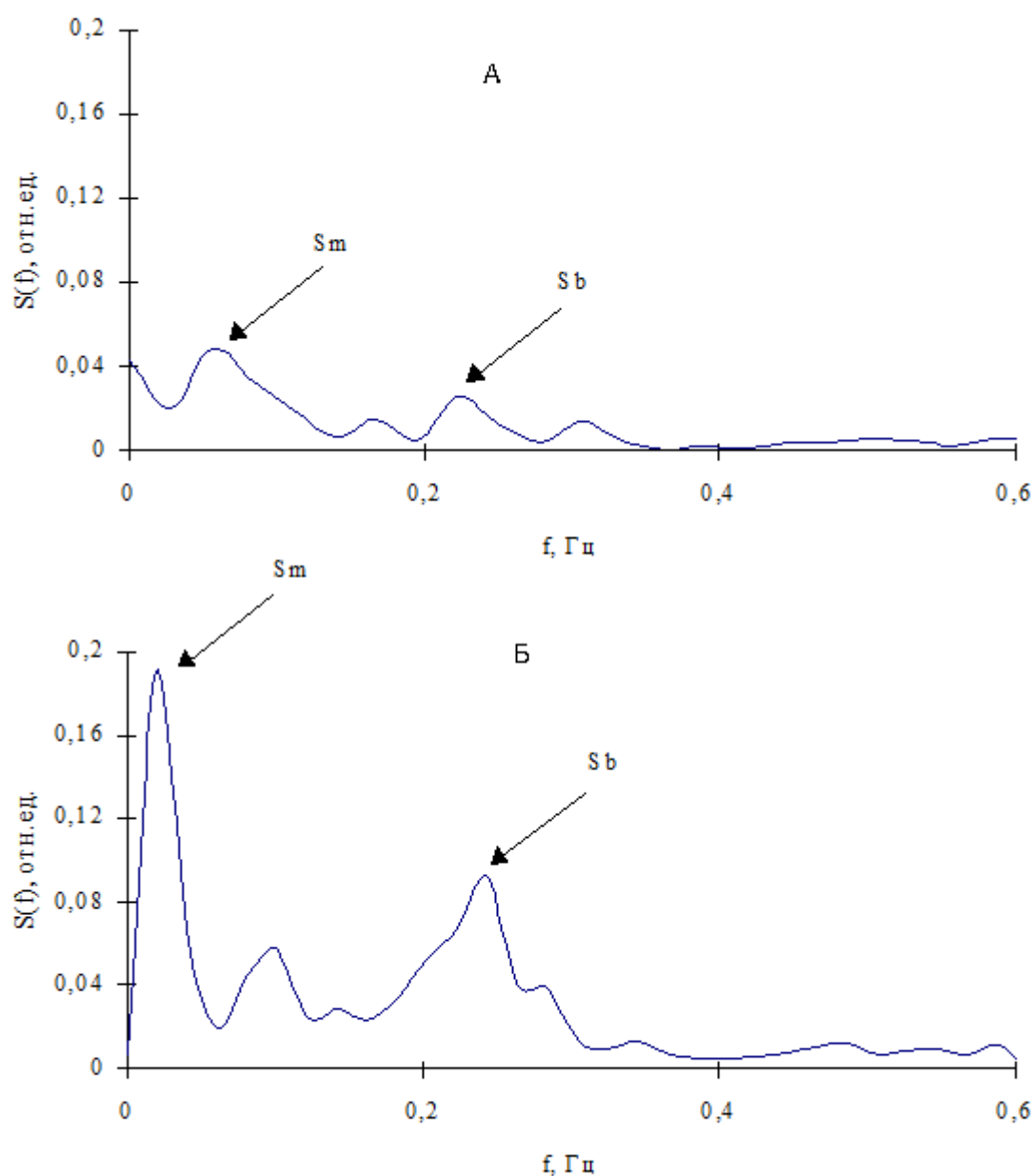


Рис. 1. Изменение спектров мощности ритма сердца при внешних воздействиях слабой или средней интенсивности: А – исходное состояние; Б – состояние напряженности

При действии внешних раздражителей значительной или экстремальной интенсивности спектральные компоненты достигают некоторых пороговых значений, при этом меня-

ется волновая структура ритма сердца и, следовательно, его спектральная формула (рис. 2), что свидетельствует об изменении функционального состояния организма человека.

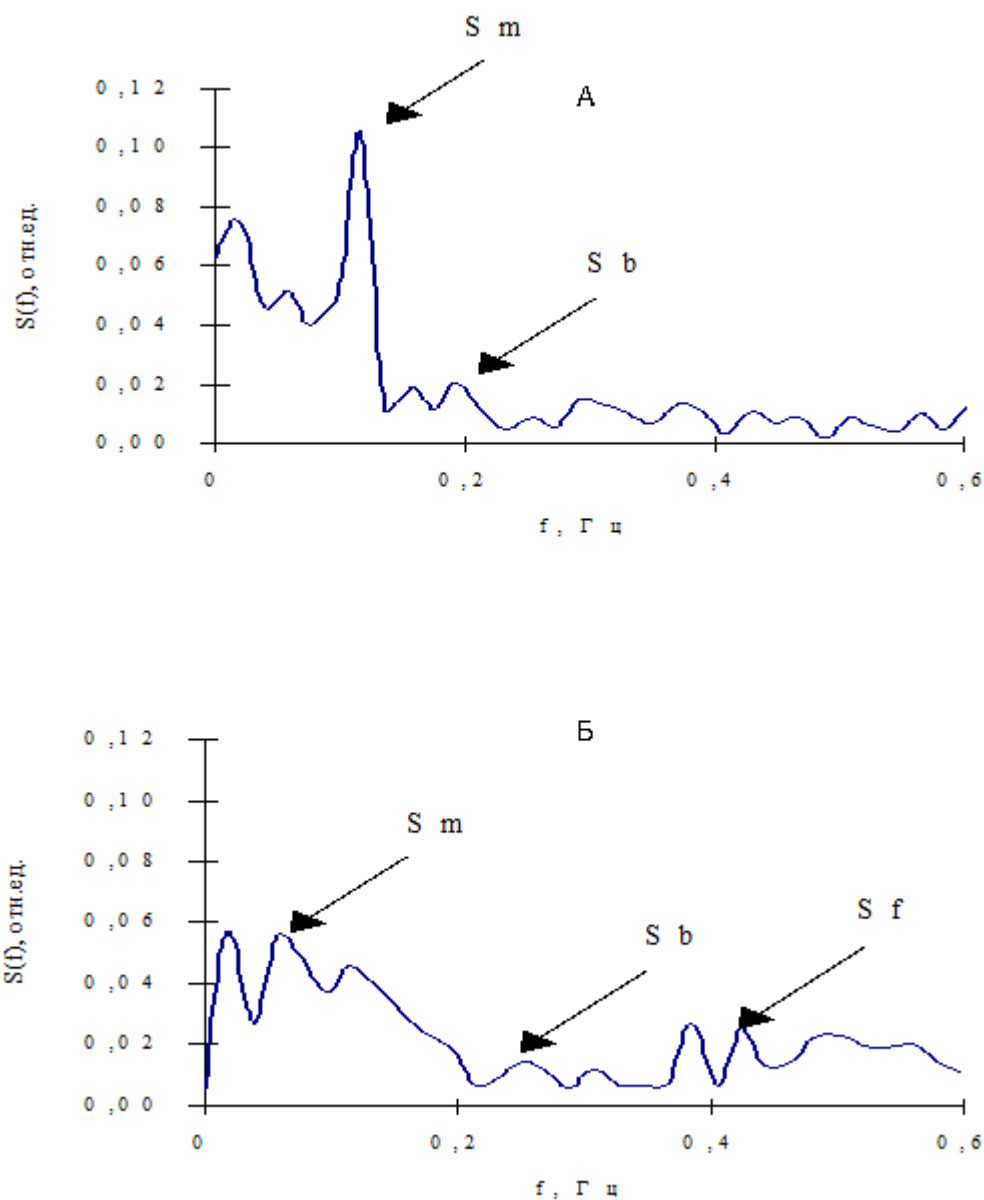


Рис. 2. Изменение спектров мощности ритма сердца при внешних экстремальных воздействиях:
А – исходное состояние; Б – состояние напряженности

Спектры кардиоинтервалограмм можно классифицировать с помощью спектральных индексов. Спектральный частотный индекс (L) соответствует числу частотных диапазонов в спектре кардиоинтервалограммы, в которых присутствуют максимумы (спектральные линии), и может принимать четыре зна-

чения: 0, 1, 2 и 3. Если максимумы в спектре отсутствуют, то $L=0$. Если максимумы наблюдаются только в низкочастотной, среднечастотной или высокочастотной областях, то $L=1$. Если максимумы наблюдаются в каких-либо двух из трех областей (низко- и среднечастотной, низко- и высокочастотной

либо средне- и высокочастотной), то $L=2$. Если максимумы присутствуют одновременно во всех трех частотных областях, то $L=3$.
Спектральный комбинаторный индекс (К)

характеризует порядок записи спектральных максимумов в формуле и может принимать значения от 1 до 6 (табл. 1).

Таблица 1

Значения комбинаторного индекса К при различных соотношениях между Sm, Sb и Sf

Комбинации компонентов Sm, Sb, Sf			К
Sm	Sb	Sf	1
Sm	Sf	Sb	2
Sf	Sm	Sb	3
Sf	Sb	Sm	4
Sb	Sf	Sm	5
Sb	Sm	Sf	6
Или			
Sb	Sm	Sf	2
Sb	Sf	Sm	3
Sf	Sb	Sm	4
Sf	Sm	Sb	5
Sm	Sf	Sb	6

Спектры So кардиоритмограмм, для которых характерно отсутствие периодических составляющих и, следовательно, спектральных максимумов, наблюдаются при предтерминальных состояниях и при некоторых патологических процессах [6]. Переход из них возможен только в состояния с более высоким энергетическим уровнем.

Спектры Sm характерны для стабильных состояний с более высоким энергетическим уровнем. Они отмечаются у лиц с недостаточностью адаптационных механизмов, которые не способны обеспечить оптимальную реакцию организма на воздействие внешних факторов, и встречаются при перенапряжении регуляторных механизмов организма, при патологических процессах, преморбидных состояниях с преобладанием специфических изменений [6]. Из таких состояний возможны переходы как на более низкий энергетический уровень So, так и на более высокие энергетические уровни Sb, SmSb и SbSm.

Спектры Sb отмечаются у лиц с высокими энергетическими и функциональными резервами, обеспечивающими полную адаптацию к факторам внешней среды при оптимальном напряжении регуляторных систем организма [6]. Данные состояния весьма устойчивы, и для их достижения из более низких энергетических уровней требуется наибольшее количество вынужденных и спонтанных переходов.

Наиболее часто встречаются спектры SmSb, регистрируемые при состояниях полной или частичной адаптации организма (в зависимости от соотношения Sm и Sb) к внешним условиям, которая сопровождается минимальным напряжением регуляторных систем. Они характерны для обычных нетренированных лиц [3]. Из этих состояний возможны переходы как на более низкие стабильные энергетические уровни Sm, Sb и So, так и на более высокий SbSm. Спектры SbSm характеризуют стабильные состояния у лиц с

высокой тренированностью, у которых полная адаптация к факторам внешней среды обеспечивается за счет повышенного расхода энергетических и структурных элементов в организме [3, 6]. Из этих состояний возможны переходы только на более низкие стабильные энергетические уровни.

Если рассматривать организм человека как ультрастабильную систему, то при переходах из одного функционального состояния в другое должны выполняться следующие правила: а) переход из одного стабильного состояния в другое, более высокоэнергетическое, возможен только через ряд последовательных квазистационарных состояний (цепь вынужденных и спонтанных переходов). Если в цепи переходов содержится только одно квазистационарное состояние, то существует вероятность возврата системы в исходное состояние (один вынужденный и один спонтанный переходы); б) переходы на более высокий энергетический уровень сопровождаются спектром поглощения, который не содержит выраженных максимумов (процесс без явной периодичности). Переход на более низкий энергетический уровень сопровождается спектром испускания, который содержит максимумы S_m , характерные для исходного состояния, с частотами, определяемыми продолжительностью перехода (чем меньше период перехода, тем более сдвинуты максимумы в область высоких частот); в) в случае разрешенных переходов либо спектральный частотный (L), либо комбинаторный (K) индексы изменяются.

Чем больше степеней свободы, тем меньше связей между отдельными уровнями и звеньями регуляторной системы, больше спонтанных переходов между подсостояниями в пределах основного состояния, выше вероятность перехода в другое основное состояние. При малом количестве степеней свободы количество переходов в пределах одного состояния уменьшается, и снижается вероятность перехода в новое основное состояние. Следовательно, ультрастабильная система с большим количеством степеней свободы (высоким общим волновым числом) быстро приходит к равновесию, и форма ее поведения более адаптивна, но она при этом оказывается менее стабильной.

По сравнению с низкоэнергетическими состояниями, многокомпонентные высокоэнергетические обладают большей степенью свободы, но меньшей стабильностью. Поэтому многокомпонентные квазистационарные состояния, имеющие большие общие волновые числа, обладают меньшим временем жизни, чем основные.

На основании анализа литературных [1, 4, 5, 10] и собственных данных [3, 7, 8] можно заключить, что частотные диапазоны медленно-, средне- и высокочастотных периодических составляющих ритма сердца широко перекрываются (в зависимости от состояния организма). В связи с этим для более четкого разделения S_m , S_b и S_f может возникнуть необходимость в одновременной регистрации с ритмокардиограммой артериальных осциллограмм и спирограмм.

Для оценки функционального состояния организма человека с помощью математического анализа ритма сердца необходимо использовать ритмокардиограммы продолжительностью 2–10 мин. При более продолжительных периодах регистрации в спектре ритмокардиограммы возможно увеличение числа частотных диапазонов за счет появления новых низкочастотных периодических компонентов. При этом спектральная формула функционального состояния может усложниться, количество стабильных и квазистационарных состояний и путей переходов между ними – увеличиться. Однако изложенные выше основные закономерности и правила переходов между состояниями будут сохраняться.

Таким образом, представлен новый подход, позволяющий на основе теории ультрастабильности живых систем формализовать описание и переходы между функциональными состояниями организма человека, а также оценивать и прогнозировать их изменения в экстремальных условиях.

1. Баевский Р. М. Проблемы физиологической нормы: математическая модель функциональных состояний на основе анализа variability сердечного ритма / Р. М. Баевский, А. Г. Черникова // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. – 2002. – Т. 36, № 6. – С. 11–17.

2. Ильин И. Н. Структурно-лингвистический подход к оценке функционального состояния организма человека / В. Н. Ильин, В. В. Кальниш, Х. А. Курданов // Докл. НАНУ. – 2001. – № 6. – С. 185–189.
3. Криворученко Е. В. Новый подход к оценке работоспособности спортсменов, специализирующихся в циклических видах спорта, по анализу показателей variability сердечного ритма / Е. В. Криворученко, В. Н. Ильин // Сб. материалов Международной научн. конф. «Состояние и перспективы развития медицины в спорте высших достижений: СпортМед-2006». – М. : Ани-таПресс, 2006. – С. 171–172.
4. Михайлов В. М. Variability ритма сердца: опыт практического применения метода / В. М. Михайлов. – Иваново : Иван. гос. мед. академия, 2002. – 290 с.
5. Ритм сердца у спортсменов / под ред. Р. М. Баевского и Р. Е. Мотылянской. – М. : Физкультура и спорт, 1986. – 143 с.
6. Ритмокардиографические методы оценки функционального состояния организма человека / В. Н. Ильин [и др.]. – М. : Илекса ; Ставрополь : Сервис-школа, 2003. – 80 с.
7. Структурно-лингвистический анализ реакций организма человека на физическую нагрузку / В. Н. Ильин [и др.] // Медицинская информатика и инженерия. – 2009. – № 3. – С. 48–54.
8. Структурно-лингвистический подход к оценке функционального состояния организма человека в условиях высокогорья / В. Н. Ильин [и др.]. – М. : Илекса ; Ставрополь : Сервисшкола, 2003. – 80 с.
9. Эшби У. Р. Конструкция мозга / У. Р. Эшби. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1962. – 398 с.
10. Якимов А. М. Использование кардиомониторов сердечного ритма для контроля тренировочных и соревновательных нагрузок в подготовке бегунов на выносливость / А. М. Якимов, В. Г. Кукушкин // Теория и практика физ. культуры. – 2005. – № 2. – С. 16–17.
11. Task Force of the European of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart Rate Variability. Standarts of Measurements, Physiological Interpretation, and Clinical Use // Circulation. – 1996. – Vol. 93, № 5. – P. 1043–1065.

EVALUATION OF FUNCTIONAL STATE OF HUMAN ORGANISM IN THE EXTREMAL CONDITION ON THE BASIS OF THE THEORY OF ULTRASTABLE SYSTEMS

V.N. Ilyin, M.M. Filippov, A. Alwani

Nationa lUniversity of Physical Education and Sport of Ukraine, Kiev, Ukraine

New approach to an assessment and forecasting of changes of a functional condition of a human body in extreme conditions is offered. It is based on the proposition that the human body is an ultra-stable system that can only be in discrete states. By external influences or spontaneously transition between states occurs abruptly according to certain rules. These states and transition rules can be classified and described using spectral formulas and indices, wave numbers and complex mathematical and statistical indicators of heart rhythm or any other periodic process in the body.

Keywords: functional state, ultra-stable system, heart rhythm, spectral formula, extreme conditions.