

DIE METHODIK

DER ANALYSE DER HERZRHYTHMUSVARIABILITÄT

(Verfahren aus Weltraummedizin)

Dr. Med. Prof. R.M. Baevsky

Juli, 1999
Copris Handelsgesellschaft mbH Berlin

Ost-West-Kooperationszentrum
Rudower Chaussee 29, OWZ Geb, 12489 Berlin
Tel/Fax: +49(030)6392-6755, +49(030)312-3407
E-mail: berlin@copris.com
URL: <http://www.copris.com>

Inhaltsverzeichnis

<i>Einleitung</i>	<i>Seite 2</i>
1. Physiologische und wissenschaftliche Grundlagen der Analyse der Herzrhythmusvariabilität (HRV-Analyse)	<i>Seite 2</i>
1.1. Theoretische Grundsätze der HRV-Analyse	<i>Seite 2</i>
1.2. Hauptmethoden der Analyse der HRV-Analyse	<i>Seite 5</i>
2. Die komplexe Bewertung	<i>Seite 10</i>
3. Wissenschaftliches Konzept der Bewertung des funktionalen Zustandes der Testperson	<i>Seite 11</i>
4. Begriffe und Abkürzungen	<i>Seite 17</i>
<i>Anlage: Abb. 1 und 2</i>	<i>Seite 20</i>
<i>Literatur</i>	<i>Seite 21</i>

Die Methodik der Analyse der Herzrhythmusvariabilität (HRV)

Einleitung

Analyse der Variabilität des Herzrhythmus ist moderne naturwissenschaftliche Untersuchungsmethoden und Verfahren der Forschung und Diagnostik des Zustandes von Regulationsmechanismen des Organismus, u.a. des funktionalen Zustandes verschiedener Unterteilungen des vegetativen Nervensystems. Die Erforschungen der Herzrhythmusvariabilität (HRV) starteten bereits Anfang der 60er Jahre gleichzeitig in der Weltraummedizin (V.V.Parin, R.M.Baevsky, Y.N.Volkov, O.G.Gasenko, 1967) und der Krankenhauspraxis (D.Zemaitite, 1972). In den 60ern und 70ern Jahren wurden in der UdSSR breite Forschungsarbeiten unter Verwendung der mathematischen Analyse des Herzrhythmus in der Kardiologie, Chirurgie, der Arbeits- und Sportphysiologie und der experimentellen Physiologie durchgeführt (R.M.Baevsky, O.I.Kirillov, S.Z.Kletckin, 1984). In Westeuropa und USA haben sich die HRV-Untersuchungen erst Ende 70er / Anfang 80er herausgebildet. Gegenwärtig entwickelt sich diese Methoden besonders aktiv. Monatlich erscheinen einige Dutzend wissenschaftlicher Veröffentlichungen über die Variabilität des Herzrhythmus (C.M.A. van Rawnwaaij, I.A.Kollee, J.C.Hopman et al., 1993). Kein Kardiologie-Kongress oder Symposium geht ohne die Besprechung dieses Thema aus. Während des letzten Jahrzehnts haben sich in Russland und anderen Ländern verschiedene Ansätze bei der HRV-Analyse, die einander allerdings nicht widersprechen, herauskristallisiert. In großem Ganzen wird HRV als Resultat der Aktivierung unterschiedlicher die Herz- und Kreislaufhomeostase unterstützender Regulationsmechanismen angesehen. Zur Zeit ist die wissenschaftliche und angewandte Bedeutung der HRV-Analysemethoden allgemein anerkannt, und jedes Jahr erfahren sie eine immer größere Verbreitung. Die weitere Vervollkommnung der Methodologie der HRV-Analyse ist mit der raschen Entwicklung der Computertechnologien verbunden. Heute tragen die durch den Computer eröffneten Möglichkeiten zur Entwicklung komplexer Verfahren bei.

1. Physiologische und wissenschaftliche Grundlagen der Analyse der Herzrhythmusvariabilität (HRV-Analyse)

1.1. Theoretische Grundsätze der HRV-Analyse

Die Weltraummedizin war einer der ersten Bereiche von Wissenschaft und Praxis, wo die Analyse des HRV (mathematische Analyse des Herzrhythmus) für den Erhalt neuer wissenschaftlicher Information und zur Lösung der Aufgaben medizinischer .

Kontrolle der Kosmonauten verwendet wurde. Dabei wurden die Reaktionen des Kreislaufsystems, u.a. dessen Regulationsmechanismen, als Resultat der Organismusadaptation an die große Anzahl verschiedener inneren und auch äußeren Geschehnisse betrachtet. In diesem Zusammenhang entwickelte sich vor mehr als einem Viertel Jahrhunderts das Konzept über das Herz- und Kreislaufsystem als den Indikator der Anpassungsreaktionen des gesamten Organismus (V.V. Parin, R.M. Baevsky, Y.N. Volkov, O.G. Gasenko, 1967). Die Regulationssysteme des Organismus überwachen den Zustand einzelner Funktionssysteme und Organe, deren Zusammenarbeit, Abstimmung der Funktionen der inneren Organe aufeinander und die Auseinandersetzung des Organismus mit der Umwelt.

Die Aktivierung der Regulationsmechanismen hängt von dem funktionalen Zustand des Organismus ab. Man könnte drei Aktivitätsniveaus der Regulationssysteme unterscheiden: 1) Kontrolle, 2) Regulation, 3) Steuerung (V.V. Parin, R.M. Bajevsky, 1966). Unter normalen Umständen, wenn das regulierte (kontrollierte) System im normalen Modus, ohne zusätzliche Belastungen, funktioniert, übernimmt der Regulationsmechanismus nur die Kontrollfunktionen, d.h. erhält Information über den Zustand des regulierten Systems und greift in deren Tätigkeit nicht ein. Entstehen aber zusätzliche Belastungen und benötigt das regulierte System einen erhöhten Energieverbrauch, geht der Regulationsmechanismus in den anderen Arbeitsmodus über - er schreitet in den Steuerungsprozess ein und korrigiert ihn, indem er dem regulierten System bei dessen Funktionen hilft. Dabei kann man über den Übergang des Regulationsmechanismus zu dem Regulationsniveau sprechen. In diesem Fall werden durch entsprechende humorale und Nervenkanäle Steuerungssignale gesendet, die Mobilisierung erforderlicher Zusatzreserven gewährleisten. Reichen eigene Reserven des Regulationsmechanismus für das Erzielen des notwendigen Effektes nicht aus, arbeiten die Regulationsmechanismen im Steuerungsmodus weiter. Dessen Aktivierung erhöht sich erheblich, da auch andere höhere Regulationsebenen an den Steuerungsprozess angeschlossen werden müssen, was die Mobilisierung der funktionalen Reserven aller Systeme des Organismus sicherstellt. Entsprechend den drei Aktivitätsniveaus erhöht sich die Anstrengung (die Aktivität) der Regulationsmechanismen. Somit kann man nach dem Anstrengungsniveau der Regulationsmechanismen über die funktionalen Reserven des Kreislaufsystems und die Anpassungsmöglichkeiten des gesamten Organismus urteilen.

Das Anstrengungsniveau der Regulationssysteme ist die integrale Antwort des Organismus auf die Gesamtheit der auf ihn einwirkenden Faktoren, unabhängig von dem, womit sie zusammenhängen. Bei einer Einwirkung von einem Extremreizen Charakter entsteht das Adaptationssyndrom (Stress), dessen Begriff am präzisesten von Selye (1950) definiert wurde, das eine charakteristische physiologische Reaktion des Organismus auf die Stressauslösenden Faktoren jeglicher Herkunft darstellt.

Dieses Syndrom tritt als Mobilisierung funktionaler Reserven des Organismus in Erscheinung. Der gesunde Organismus weist einen hinreichenden Vorrat an funktionalen Möglichkeiten auf und antwortet auf die Stresseinwirkung mit einer normalen sog. Arbeitsanstrengung der Regulationssysteme. Hat der Mensch keine ausreichende Funktionalreserven, kann die Regulationssystemenanstrengung sogar im Ruhezustand sehr hoch sein. Dies äußert sich u.a. in der für den erhöhten Tonus des sympathischen Bereichs des vegetativen Nervensystems charakteristischen hohen Stabilität des Herzrhythmus. Dieser Bereich des Regulationsmechanismus ist für die sofortige Mobilisierung energetischer und methabolischer Ressourcen bei beliebigen Stressarten zuständig, wird durch humorale und Nervenkanäle aktiviert und stellt ein Bestandteil des Hypothalamus-Hypophyse-adrenokortikotropes. Systems, das die Reaktion des Organismus auf die Stresseinwirkung gibt, dar. Dabei kommt eine wichtige Rolle dem zentralen Nervensystem, das alle Prozesse im Organismus koordiniert und lenkt, zu.

Das Herz ist ein äußerst empfindliches Organ aller im Organismus statfindenden Gegebenheiten. Der Herzrhythmus sowie die Kraft dessen Kontraktionen, die durch den sympathischen und den parasympathischen Bereich des vegetativen Nervensystems gesteuert werden, reagieren sehr scharf auf jegliche Stresseinwirkungen. Aus der Beschaffenheit des Pulses kann man wichtige Aufschlüsse über die Tätigkeit des Herzens (vor allen den Herzrhythmus) und den Zustand des Kreislaufes entnehmen Nicht zufällig nimmt die Pulsdiagnostik einen so wichtigen Stellenwert in der chinesischen Medizin an. Ärzte des alten Chinas und Tibets konnten anhand des Pulspalpierens eine Diagnose stellen, die Behandlung anordnen und den Verlauf der Krankheit prognostizieren. Die Veränderung des Herzrhythmus ist eine universelle operative Reaktion des gesamten Organismus auf beliebige Einwirkung der Umgebungsfaktoren. Die traditionell gemessene mittlere Herzfrequenz spiegelt nur den Endeffekt der zahlreichen Regulationseinwirkungen auf das Herzkreislaufsystem wider, charakterisiert die Besonderheiten des bereits gereiften homeostatischen Mechanismus. Leine der wichtigen Aufgaben des Mechanismus ist die Sicherstellung des Gleichgewichts zwischen dem sympathischen und dem parasympathischen Teil des vegetativen Nervensystems (vegetative Homeostase) Ein und derselben Herzfrequenz (Zahlung der Pulsschläge) können unterschiedliche Aktivitätenkombinationen der Kettenglieder des die vegetative Homeostase steuernden Systems entsprechen. Außerdem beeinflussen auch höhere Regulationsebenen den Herzrhythmus. Dies gibt Anlass dazu, den Sinusknoten wegen seiner Rhythusbildenden Funktionen als Schrittmacher des Herzens zu bezeichnen und somit als empfindlichen Indikator der Anpassungsreaktionen des Organismus im Prozess dessen Anpassung an die Umweltbedingungen anzusehen.

Die Sinus-Atmungsarrhythmie wurde im vorigen Jahrhundert von Ludwig (1847) entdeckt. Es gibt keine einheitliche Meinung über die Herkunft der Atmungsarrhythmie, obwohl die Mehrheit der Forscher den Einfluss der Atmung auf den Herzrhythmus und die Aktive Teilnahme der abwandernden Nervenzellkerne, deren Hemmung und Erregung durch

entsprechende Nervenden zu dem Sinusknoten weitergeleitet werden, wodurch Verkürzung der Dauer von Kardiointervallen beim Einatmen und die Verlängerung beim Ausatmen ausgelöst werden, an diesem Prozess für eine unwiderlegbare Tatsache halten. Die Nichtatmungsarrhythmie stellt die Schwankung des Herzrhythmus mit Perioden länger als 6-7 Sekunden (niedriger als 0,15 Hz) dar. Die langsamen (Nichtatmungs-) Schwankungen des Herzrhythmus korrelieren mit den analogen Wellen des arteriellen Druckes und des Plethysmogramms. Es werden langsame Wellen des 1n, 2n und höherer Grade unterschieden. Der existierende Wissensstand erlaubt keine ausstreichend genaue Bestimmung der Herkunftsquelle jeder Art langsamer Wellen. Sawyers (1973) ist der Meinung, dass die langsamen Wellen des Herzrhythmus des 1n Grades (mit der Periode von 7 bis 20 Sekunden) mit der Tätigkeit des Regulationssystems des arteriellen Blutdruckes und die des 2n Grades (mit der Periode von 20 bis 70 Sekunden) mit der des Thermoregulationssystems zusammenhängen. Es hat sich gezeigt, dass bei Sportlern mit einem niedrigen Niveau der Leistungsfähigkeit sowie bei den untrainierten Personen im Ruhezustand das Auftreten der Komponenten der langsamen Wellen öfter beobachtet wird (V.I.Vorobjev, 1978). Kapezhenas und Zemaitite (1983) stellten bei andauernden physischen Belastungen und der Senkung der Trainiertheit der Leistungssportler eine Veränderung des Rhythmogrammtypes mit dem Übergang vom Rhythmus mit einer großen Amplitude des Atmungswellen zum Vorherrschen der langsamen Wellen.

1.2. Hauptmethoden der HRV-Analyse

Die Untersuchungsmethoden der Herzrhythmusvariabilität kann man in drei Gruppen teilen: 1) die statistische Einschätzung des Zahlbestandes der Kardiointervalle, 2) die Bewertung der Zusammenhänge zwischen Kardiointervallen, 3) die Feststellung der latenten Periodizität der dynamischen Reihe der Kardiointervalle (R.M.Bajevsky, O.I.Kirillov, S.Z.Kletckin, 1984). Gemäß den vor kurzem veröffentlichten Standards der Europäischen Kardiologischen Gemeinschaft und der Nordamerikanischen Gesellschaft der Elektrophysiologie (Heart rate variability, 1996) werden zwei Methodengruppen bestimmt: Zeit- (Time Domain Methods) und Frequenzmethoden (Frequency Domain Methods). Zu den Zeitmethoden zählen die statistische Analyse und geometrische Methoden, zu den Frequenzmethoden – die spektrale Analyse.

Während der letzten 30 Jahre wurden in Russland (UdSSR) meistens folgende fünf Methoden der Herzrhythmusanalyse verwendet: 1) statistische Verfahren, 2) Varianzanalyse (entspricht den geometrischen Methoden nach europäischen und amerikanischen Standards), 3) Autokorrelationsanalyse, 4) Korrelationstechniken (Verfahren) und 5) Spektralanalyse.

Diese Methoden sind am meisten verbreitet. Bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt wurde eine große Erfahrung bei verschiedenen Anwendungen in der Krankenhausmedizin und der angewandten Physiologie gesammelt. Die in dieser Untersuchung verwendete Software realisiert alle o.g. Methoden der HRV-Analyse.

In der Abbildung 1. ist ein Beispiel graphischer von dem mathematischen Programm erstellten Darstellungen von Kardiointervallen mit einer Dauer von 5 Minuten aufgeführt. [Oben (1a) befindet sich das Kardiointervalldiagramm (dynamische Reihe der Kardiointervalle), in der Mitte links (1b) – graphische Darstellung der Häufigkeitsverteilung der Kardiointervalllänge, das Histogramm (Blockdiagramm), unten links (1d) – Streudiagramm (Scattergramm) – „Wolke“ der gegenseitigen Zusammenhänge der Werte aufeinander folgender Paare der R-R-Intervalle, in der Mitte rechts (1c) – graphische Darstellung der Werte der Autokorrelationsfunktion, unten rechts (1e) – spektrale Funktion der dynamischen Reihe der R-R-Intervalle (Dichte des Leistungsspektrums). Die Bandbreiten (in Sek. und Herz- $1 \times 1000 \text{ Hz}$.) sind für die HF-LF- und VLF-Spektrumkomponente gezeigt]. Dank der graphischen Darstellung werden einige informative Parameter beobachtet und Kennwerte errechnet, Dabei wird nach einer bestimmten Zusammenstellung der Parameter ein Gutachten über den Grad der Regulationssystemanspannung (Parameter der Regulationssystemaktivität RSAI) gebildet. Somit stellt die benutzte Software die Durchführung einer komplexen Analyse der Herzrhythmusvariabilität, die keine Analoge in der Weltpraxis hat, sicher.

Statistische Verfahren

Statistische Charakteristika der dynamischen Kardiointervallreihe beinhalten Herzfrequenz (HR), mittlere quadratische Abweichung (Standardabweichung) (CD), Variabilitätskoeffizient (CV). Außer diesen „klassischen“ Parametern werden vier Differenzparameter berechnet. Dafür wird eine neue dynamische Reihe der Zahlwerte, d.h. der Differenzwerte zwischen jedem vorausgehenden und folgenden Kardiointervall, gebildet. Während die Art und Stärke des Zusammenhangs nur schwer aus den numerischen werten zu erkennen ist, bietet die graphische Veranschaulichung korrelativer Zusammenhänge ein entsprechend informatives Bild, noch ohne Berechnung eines Korrelationskoeffizienten. Beim Erhalt einer Reihe der Differenzwerte gelingt es, die Konstante der dynamischen Reihe und alle langsamen Schwankungen zu eliminieren. Somit bleibt hier nur die schnelle Variabilitätskomponente, d.h. die Atmungsschwankungen der Kardiointervalllänge. Deswegen könnte man behaupten, dass alle Differenzparameter in dem ein oder anderem Maße die Aktivität des parasympathischen Bereiches des vegetativen Nervensystems darstellen und somit den autonomen Regelkreis charakterisieren.

Varianzanalyse

Der Kern der Varianzanalyse liegt in dem Erhalt einer Verteilungsgesetzmäßigkeit der R-R-Intervalle als Zufallsgrößen. Dafür wird eine Verteilungskurve gebildet, das Histogramm. Die Methode der Varianzanalyse entspricht geometrischen Methoden nach den europäischen und amerikanischen Standards. In der Abb. 1.b ist eine typische Verteilungskurve mit den darauf gekennzeichneten mathematischen Parametern: Mo

(Modus), AMo (Modusamplitude), MxDMn (Variabilitätsbreite) gezeigt. Im folgenden werden kurze Erläuterungen der genannten Parameter gegeben.

Der Modus ist der in der gegebenen dynamischen Reihe am häufigsten anzutreffende Wert des R-R-Intervalles. Im physiologischen Sinne ist es das wahrscheinlichste Niveau des Funktionierens des Herzkreislaufsystems. Unter den gegebenen Voraussetzungen, unterscheidet sich Mo bei einer normalen Verteilung und hoher Beständigkeit (Varianzhomogenität) des untersuchten Prozesses von dem mathematischen Erwartungswert nur wenig.

Die Modusamplitude (AMo) ist Anzahl der dem Modalwert entsprechenden R-R-Intervalle in % der Gesamtzahl aller Messwerte einer Stichprobe. Dieser Parameter spiegelt den stabilisierenden Effekt der Steuerungscentralisation des Herzrhythmus wider, der vom Aktivierungsgrad der sympathischen Unterteilung des vegetativen Nervensystems bedingt wird.

Die Variabilitätsbreite (MxDMn) zeigt den Variationsgrad der Werte der R-R-Intervalle in der untersuchten dynamischen Reihe an. Sie wird nach den Differenzen zwischen den maximalen und minimalen Werten der R-R-Intervalle ermittelt. Deswegen können bei Arrhythmien und Artefakten Fehler unterlaufen, wenn die dynamische Reihe der R-R-Intervalle vorher nicht bearbeitet wurde. Bei der Errechnung von MxDMn sind die Extremwerte Fallenzulassen, falls diese weniger als 3% vom Gesamtzahl der Stichprobenwerte ausmachen. Der physiologische Sinn des Variabilitätsmaßes MxMDn wird i.d.R. mit der Aktivität der parasympathischen Unterteilung des vegetativen Nervensystems erklärt. Bei einer Stichprobe von 128 R-R-Intervallen ohne Übergangsprozesse überwiegt die Amplitude der Atmungswellen über die Amplitude der Nichtatmungsschwankungen des Herzrhythmus. In einer Reihe von Fällen können die MxDMn-Werte bei einer erheblichen Amplitude der Komponente langsamer Wellen allerdings den Zustand der subkortikalen Zentren widerspiegeln.

Nach den Daten der Varianzanalyse wird die Reihe abgeleiteter Parameter, von welchen der Anspannungsindex der Regulationssysteme (SI), der den Zentralisationsgrad der Steuerung des Herzens und hauptsächlich die Aktivität der sympathischen Unterteilung des vegetativen Nervensystems reflektiert, am häufigsten verwendet wird, gebildet. SI wird nach der folgenden Formel ermittelt:

$$SI = \frac{AMo}{2Mo \cdot MxDMn}$$

Dieser Parameter erfuh eine breite Verwendung in der Leistungssportmedizin, Arbeitsphysiologie, Weltraumforschung sowie in der klinischen Praxis. Der SI-Wert schwankt innerhalb der Norm zwischen 50 und 150 Rechnungseinheiten. Bei emotionalem Stress und physischer Belastung erhöhen sich die SI-Wert 600-700 Einheiten, im Vorinfarktzustand sogar 900-1100 Einheiten.

Korrelationstechniken (-Verfahren)

Dies ist eine Methode der graphischen Darstellung dynamischer Reihe der R-R-Intervalle in der bivariaten Normalverteilungsform durch die Bildung einer Punktereihe in dem rechtwinkligen Koordinatensystem. Dabei ist auf der Ordinatenachse jeder laufende R-R-Intervall und auf der Abszissenachse jeder nächste R-R-Intervall abgebildet. Diese Verteilungsform ist die Grundlage der Korrelationstheorie. Sie entsteht dann, wenn jeder der A-Meßwerte auf einer kontinuierlichen Skala gemessen werden kann, in der Grundgesamtheit normal verteilt ist und die Verteilung der N-Paare von Messwerten elliptisch aussieht. Auf der Abbildung 1d ist ein Beispiel typischen Streudiagramm gezeigt. Ein wichtiger Vorteil dieser Methode ist die Möglichkeit, die Herzarrhythmien effektiv zu erkennen und zu analysieren. Die kennzeichnenden Zahlparameter der jeweiligen Punktconfiguration sind Achsen (a und b) der von einer Punktwolke gebildeten Ellipse und deren Verhältnis (a/b). Der physiologische Sinn des Verhältnisses a/b ist dem SI-Wert ähnlich, der das Zentralisierungsniveaus des Herzrhythmus, die Aktivität der sympathischen Unterteilung des vegetativen Nervensystems charakterisiert.

Autokorrelationsanalyse

Ermittlung und Aufstellung der Autokorrelationsfunktion der dynamischen Reihe der R-R-Intervalle (Abb. 1c) ist auf die Untersuchung der inneren Struktur dieser Reihe als Zufallsprozess ausgerichtet. Die Autokorrelationsfunktion ist ein Graph der Dynamik der bei einer aufeinander folgenden Verschiebung der analysierten dynamischen Reihe auf ein Glied der Zahlenfolge erhaltener Korrelationskoeffizient desto kleiner als 1 je mehr die Atmungswellen ausgeprägt sind. Dominieren in der untersuchten Stichprobe die Komponenten der langsamen Wellen, wird der Korrelationskoeffizient nach der ersten Verschiebung nur unwesentlich niedriger als 1. Die nächsten Verschiebungen führen zur allmählichen Verringerung der Korrelationskoeffizienten bis zur Erscheinung negativer Korrelationskoeffizienten. Der physiologische Sinn der Verwendung von Autokorrelationsanalyse liegt in der Bewertung des Einflussniveaus des zentralen Regelkreises auf den autonomen. Je stärker dieser Einfluss, desto näher der 1 ist der Wert des Korrelationskoeffizienten bei der ersten Verschiebung. Die Autokorrelation erlaubt, über die verborgene Periodizität des Herzrhythmus zu urteilen. Eine solche Analyse hat allerdings nur einen quantitativen Charakter.

Die Spektralanalyse

Die spektrale Analyse dient einer genauen quantitativen Bewertung der periodischen Prozesse im Herzrhythmus (R.M.Baevsky, O.I.Kirillov, S.Z.Kletzkin, 1984; Pagani M., Lombardi F., Guzzetti, 1984; M.Lichner, S.Akselrod, V.M.Avi, 1987; Lipsitz L.A., Mietus J., Noody G.B., 1991). Der physiologische Sinn der Spektralanalyse besteht darin, dass mit seiner Hilfe die Aktivität einzelner Ebenen der Herzrhythmussteuerung bewertet wird. Auf der Abb. 1e ist ein Muster des typischen Herzrhythmuspektrums einer 5-minütigen Stichprobe gezeigt. Auf der Abszissenachse werden Werte der Schwankungsperioden in

Wissenschaftlicher Bericht

Sekunden und auf der Ordinatenachse die Leistungen entsprechender spektraler Komponenten im Millisekunden zu Quadrat (ms^2) eingetragen. Bei der Spektralanalyse der so kurzen dynamischen Reihen der R-R-Intervalle mit einer Länge von bis zu 5 Minuten kann man nur die Leistungen der Atmungswellen und langsamer Wellen des 1. und 2. Grades messen. Was die langsamen Wellen des 2. Grades betrifft, so haben diese nach den europäischen und amerikanischen Standards eine Bandbreite von 0,04 bis 0,003 Hz oder von 25 bis 300 Sek. Vielzählige Publikationen zeugen aber davon, dass innerhalb der genannten Bandbreiten Schwankungen unterschiedlicher Natur beobachtet werden: die mit Prozessen der Thermoregulierung (Sawyers, 1973, 1981), den Oxidations- und Wiederherstellungsprozessen (A.V.Karpenko, 1977) und mit den Prozessen des Metabolismus, u.a. Glykolyse, verbunden sind. Somit kann man in einer Bandbreite bis zu 5 Minuten nicht nur die Wellen des 2. sondern auch die des 3. und des 4. Grades bestimmen. Die verwendete Software berechnet die langsamen Wellen des 2. Grades in einem Intervall von 25 bis 70 Sekunden (0,04-0,025 Hz) (Chaspekova, 1994). Diese Wellen werden i.d.R. mit der Aktivität der Übersegment-Gehirnbereiche, der Aktivität der sympathischen subkortikalen Zentren assoziiert. Was die langsamen Wellen des 3-4 Grades anbetrifft, so wird deren Hauptleistung i.d.R. durch die 1. Spektrumsharmonika widerspiegelt. Die Bezeichnungen der spektralen Komponente wurden gemäß den europäischen und amerikanischen Standards bestimmt. Die Benennungen sind mit der Frequenzbandbreite verbunden: HF, LF, VLF, ULF. Diese Bandbreiten werden in der Tabelle 1 dargestellt.

Bei der spektralen Analyse wird im Normalfall für jeden Komponent die absolute summierte Leistung innerhalb der Bandbreite, die mittlere Leistung in der Bandbreite, der Wert der maximalen Harmonika und der Relativwert in % von der summierten Leistung innerhalb aller Bandbreite (Total Power-TP) berechnet. Nach den Daten der Spektralanalyse des Herzrhythmus werden folgende Parameter ermittelt: Index der Zentralisation IC und Index der Aktivierung der subkortikalen Zentren ISCA.

$$\text{IC} = (\text{VLF} + \text{LF}) / \text{HF} ; \quad \text{ISCA} = \text{LF} / \text{VLF}$$

Tabelle 1

Frequenzkomponenten des Variabilitätsspektrums des Herzrhythmus

Bezeichnung der Spektrumkomponenten	Frequenzbandbreite in Hz	Periode in Sek.
HF	0,4-0,15	2,5-7
LF	0,15-0,04	7-25
VLF	0,04-0,015	25-70
ULF	<0,015	>70

Der Parameter IC zeigt den Grad des Dominierens der Nichtatmungskomponenten der Sinusarrhythmie über die Atmungskomponenten. Eigentlich ist dies eine quantitative Charakteristika der Verhältnisse zwischen der zentralen und autonomen Herzrhythmusregulation. Der Index ISCA charakterisiert die Aktivität des subkortikalen Herzkreislaufnervenzentrums im Verhältnis zu höheren Steuerungsebenen. Eine erhöhte Aktivität der subkortikalen Zentren wird durch das Wachsen des ISCA sichtbar. Mit Hilfe dieses Indexes können die Prozesse der subkortikalen Hemmung kontrolliert werden. Außerdem wird gemäß den europäischen und den amerikanischen Standards das Verhältnis HF/LF berechnet.

2. Die komplexe Bewertung

Eine solche Bewertung der Herzrhythmusvariabilität kann nach dem Parameter der Aktivität von Regulationssystemen (RSAI) erfolgen. Dieser Parameter wird in Punkten nach einem speziellen die Statistik- und Histogrammparameter und die Spektralanalysedaten berücksichtigenden Algorithmus errechnet. RSAI ermöglicht die Differenzierung verschiedener Niveaus der Anspannung von Regulationssystemen RSAI wurde bereits Anfang der 80er Jahre verwendet und erwies sich als nützlich bei der Bewertung der Adaptationsmöglichkeiten des Organismus (R.M.Baevsky und andere, 1964). Der Algorithmus dessen Berechnung wurde schrittweise verbessert, und es wurde bis zum heutigen Zeitpunkt ein neuer Algorithmus entwickelt, der die Werte aller Hauptparameter der Herzrhythmusvariabilität in Betracht zieht.

Die Errechnung des RSAI erfolgt nach einem Algorithmus, der folgende fünf Kriterien berücksichtigt :

- A. Summarischer Regulationseffekt nach den Parametern der Pulsfrequenz (HR).
- B. Summarische Aktivität der Regulationsmechanismen nach mittelquadratischer Abweichung – SD (oder nach der summarischen Spektrumleistung – TP).
- C. Vegetatives Gleichgewicht nach einem Parameterkomplex : SI, RMSSD, HF, IC.
- D. Aktivität des Herzkreislauf-Unterrindennervenzentrums oder über segmentarer Regulationsniveaus nach der Leistung des Spektrums langsamer Wellen des 2 Grades (VLF)

Die RSAI-Werte werden in Punkten von 1 bis 10 ausgedrückt. Aufgrund der Analyse der RSAI-Werte können folgende funktionale Zustände diagnostiziert werden:

1. Zustand der optimalen Anstrengung der Regulationssysteme, der zur Sicherstellung des aktiven Gleichgewichts des Organismus mit der Umwelt erforderlich ist (RSAI-Normwert=1-2).
2. Zustand einer gemäßigten Anstrengung der Regulationssysteme, wenn der Organismus für die Anpassung an die Bedingungen der Umwelt zusätzliche funktionale Reserven benötigt. Diese Zustände entstehen im Adaptationsprozess an die Arbeitstätigkeit, beim emotionalen Stress und bei der Einwirkung ungünstiger ökologischer Faktoren (RSAI=3-4)

3. Zustand einer ausgeprägten Anstrengung der Regulationsmechanismen, der mit einer aktiven Mobilisierung der Schutzmechanismen, u.a. der Aktivitätserhöhung des Sympathiko-Adrenal Systems und des Hypophyse-Systems (RSAI=4-6).
4. Zustand der Überanstrengung der Regulationssysteme, für den eine Insuffizienz der Schutz- und Anpassungsmechanismen, die nicht in der Lage sind, eine adäquate Reaktion des Organismus auf die Einwirkungen der Umwelt zu gewährleisten, charakteristisch ist. Die überflüssige Aktivierung der Regulationssysteme wird in diesem Fall von entsprechenden funktionalen Reserven nicht untermauert (RSAI=6-8).
5. Zustand der Erschöpfung (Asthenie) der Regulationssysteme, bei dem sich die Aktivität der Steuerungsmechanismen verringert (Insuffizienz der Regulationsmechanismen) und die charakteristischen Anzeichen der Pathologie zum Vorschein kommen. Hier dominieren die spezifischen Veränderungen sichtbar über die unspezifischen (RSAI=8-10).

Es ist notwendig zu betonen, dass RSAI keine Analoge in westlichen Forschungen hat, da den von der europäischen Kardiologengemeinschaft und der Nordamerikanischen Gemeinschaft der Elektrophysiologie vorgeschlagenen Standards zufolge, die Möglichkeit der Verwendung der HRV-Analyse zur Bewertung der vegetativen Homeostase, des Verhältnisses der Aktivitäten der sympathischen und der parasympathischen Unterteilung des vegetativen Nervensystems und des Zustandes der Reflexfunktion die Hauptaufmerksamkeit weckt. RSAI wird zusammen mit SI mit Erfolg bei der Zustandsbeurteilung der Kosmonauten während des Fluges verwendet. Bevölkerung zur Feststellung der anfänglichen der Krankheitsentwicklung vorangehenden Veränderungen des Regulationsmechanismus (R.M.Baevsky, A.P.Berseneva, 1997).

3. **Wissenschaftliches Konzept der Bewertung des funktionalen Zustandes der Testpersonen**

Der Definition von V.I.Medviedeva (1988) nach, ist der funktionale Zustand (FZ) ein integraler Charakteristikkomplex der Funktionen und Eigenschaften des Menschen, welcher direkt oder indirekt die Erfüllung einer bestimmten Tätigkeit bedingt. Zur Bewertung von FZ werden physiologische und psychologische Parameter verwendet. Bei der physiologischen Bewertung werden unterschiedliche Parameter des zentralen Nervensystems und vegetativer Veränderungen als Indikatoren benutzt. Besonders oft werden solche Parameter wie Elektroenzephalogramm, Elektromiogramm, Hautgalvanischer Potential, Herzkontraktionsfrequenz, Atmungsfrequenz- und Tiefe usw. einbezogen. Die genannten physiologischen Parameter verändern sich mit der Entwicklung von Anstrengungs- und Ermüdungserscheinungen, der Steigerung vom Energieverbrauch, Verstärkung des Gaswechsels.

Während der letzten 10-15 Jahre war auf dem Gebiet der Kontrolle des funktionalen Zustandes des Menschen die Methode der Variabilitätsanalyse des Herzrhythmus, verbreitet. Diese Methode hat zwei Vorteile: 1) Sie ist äußerst einfach hinsichtlich des

Informationsgewinnens, da es zum Erhalt einer für die Analyse erforderlichen Reihe aufeinander folgender Kardiointervallwerten ausreicht, das Elektrokardiogramm oder andere Pulskurven zu verfolgen. 2) Sie ermöglicht, umfangreiche Daten über den Zustand vegetativer Regulation und die verschiedenen Steuerungsebenen der physiologischen Funktionen des Organismus, einschließlich der subkortikalen Regulationsebenen, zu bekommen.

Nach A.S.Egorov und W.P.Zagrjadsky (1973), wird die mentale Arbeitsfähigkeit als das Vermögen des Menschen zur Erfüllung einer konkreten Tätigkeit im Rahmen bestimmter Zeitfristen und Effektivitätsparameter definiert. Der Bewertung der geistigen Arbeitsfähigkeiten der Menschen sind viele Veröffentlichungen gewidmet (R.Lazarius, 1979; A.B.Leonova, 1984; A.S.Egorov und V.N.Zagriadsky, 1973; R.M.Baevsky und V.I.Kudrjavceva, 1975; R.M.Baevsky, K.K.Ioseliani, O.M.Poljakova, 1988; O.M.Poljakova, 1988; R.M.Baevsky, T.D.Semenova, 1986; J.Paty, P.Morault, J.Berthomieu, 1994; S.M.Rokicki, 1995). Es gibt auch wissenschaftliche Arbeiten, die z.B. speziell mit der Fahreruntersuchungen verbunden sind (W.W.Wierwille, L.A.Ellsworth, 1994). Es wird angenommen, dass die Dynamik mentaler Arbeitsfähigkeit an die Veränderung des funktionalen Zustandes des Organismus gebunden ist, obwohl dieser Zusammenhang nicht eindeutig ist. Die Tätigkeitseffizienz hängt von mindestens 3 Komponenten ab: funktionalem Organismuszustand, psychischer Motivation und professionellem Hintergrund. Wir werden nur den Fall des funktionalen Zustandes betrachten und die beiden anderen Komponenten als Konstanten ansehen. Als physiologischer Mechanismus der Senkung des Niveaus mentaler Arbeitsfähigkeit, von der die Arbeitsqualität unmittelbar abhängt, gilt allgemein die Schwächung der Erregungs- und Labilitätsprozesse, Entwicklung von Hemmung in der Gehirnrindezellen (V.V.Rosenblat, 1975, Kulak, 1967). Dabei sinken, wie bekannt, die funktionalen Möglichkeiten im Zusammenhang mit der Schwächung des aktivierenden Dynflusses des sympathischen Bereichs des vegetativen Nervensystems (A.S.Egorov, V.P.Zagrjadsky, 1973) und der Störung der neuro-humoralen Homeostase (P.Bugard, 1960). Somit kann die Kontrolle des Zustandes des vegetativen Nervensystems als Quelle notwendiger Information über die potentiellen Möglichkeiten des Organismus bei der Erfüllung der einen oder anderen Tätigkeit über den "physiologischen Preis" dieser Tätigkeit dienen. Eine besondere Stellung hat die Untersuchung der periodischen schwankenden Struktur des Herzrhythmus, die den funktionalen Zustand der Bestandteile des Steuerungssystems und der an der vegetativen und informativen Versorgung der mentalen Arbeit teilnehmenden Nervenzentren widerspiegelt, angenommen. Eine der ersten Untersuchungen dieser Art wurde im Institut der medizinisch-biologischen Probleme (IMBP) Ende der 60er Jahren von der Wissenschaftlerin V.I.Kudrjavceva (1974) durchgeführt. Sie hat das der Senkung mentaler Arbeitsfähigkeit und dem Fehlertreten vorangehende Leistungswachstum der Bestandteile langsamer Wellen des Herzrhythmus festgestellt. Auf der Basis der Varianzpulsometrie wurde außerdem gezeigt, dass während der Einarbeitung ein

deutliches Wachstum des Parameters SI des Regulationssystems bestimmt wird. Nach der 3-4stündigen Arbeit erhöhen sich die Kardiointervallvarianz und MxDMn. SI und Amo dagegen sinken, es entstehen klare Bestandteile langsamer Wellen mit einer Zeitspanne von 30-60 Sekunden.

Bei der Bewertung des funktionalen Zustandes von Testpersonen wendet man folgende methodische Ansätze angewendet:

- 1) Bewertung der Veränderungen einzelner Parameter des Herzrhythmus und deren Dynamik während des Versuches. Die Hauptaufmerksamkeit wurde dabei den das Anstrengungsniveau der Regulationssysteme widerspiegelnden Parametern (SI, RSAI) und den Spektralcharakteristika des Herzrhythmus, insbesondere den Komponenten langsamer Wellen, geschenkt.
- 2) Bewertung des Zustandes des Steuerungssystems physiologischer Funktionen des Organismus auf der Grundlage des Systemansatzes. Der Systemansatz wird von einem bekannten sowjetischen Wissenschaftler, P.K.Anochin (1975), in die Physiologie eingeführt. Er besteht darin, dass bei der Durchführung der einen oder der anderen Tätigkeit sich das so genannte funktionale System entwickelt, sich dem Prozess genau die steuernden und ausführenden Bestandteile anschließen, die das Erzielen des gewünschten Resultates sicherstellen. Im Zusammenhang mit der Bewertung funktionaler Zustände nach den Daten der Analyse der Herzrhythmusvariabilität kann man vom Entstehen eines Steuerungssystems, das aus konkreten auf eine bestimmte Weise mit einander zusammenhängenden Elementen besteht, sprechen. Die Aktivität jeden der Elemente des Steuerungssystems und das Niveau der Zusammenhänge zwischen diesen können auf der Grundlage moderner statistischer Methoden quantitativ ausgedrückt werden. Dabei entsteht die Möglichkeit, anstatt einer Vielfalt unterschiedlicher Kennzahlen eine begrenzte Anzahl der das Steuerungssystem charakterisierenden Parameter zu verwenden. Die Steuerungstheorie betrachtet den Organismus als ein System, welches die Eigenschaften der Selbstkontrolle, -regulation und -Steuerung aufweist. Die Steuerungsprozesse sind auf den Erhalt einerseits des inneren Gleichgewichts im Organismus (Aufrechterhalten der Homeostase) und andererseits der Balance zwischen dem Organismus und der Umwelt (Anpassungsprotzhesse) ausgerichtet. Dabei verändert sich das Homeostaseniveau in Abhängigkeit von den Umweltbedingungen und den Belastungen (Einwirkungen), denen der Organismus ausgesetzt ist. Somit kann man die Funktionen Des Steuerungssystems auf zwei Prozesse reduzieren: das Aufrechterhalten der Homeostase und die Gewährleistung der Anpassung an die sich verändernden Bedingungen der Umwelt.
- 3) Bewertung typengleicher Reaktionen von Testpersonengruppen auf die Veränderungen der Arbeitsbedingungen in verschiedenen Zeitabschnitten und unter unterschiedlichen Arbeitsbedingungen. Dieser Ansatz wurde auf Basis der Korrelatikonanalyse realisiert. Dabei wurden Paarkorrelationen für einzelne speziell ausselektierte

informativsten Parameter der Herzrhythmusvariabilität und die Wechselbeziehung der Steuerungssystemkomponente bestimmt.

Zur Verwirklichung des Systemansatzes bei der Bewertung funktionalen Zustandes des Organismus wurde die Faktoranalyse verwendet, die es erlaubt, durch die Wahl der am meisten mit einander zusammenhängender Parameter eine bestimmte Struktur des Steuerungssystems für die gegebenen konkreten Bedingungen zu bilden. Es wird der gesamte Datenbestand verwendet : 25 Parameter bei jedem Testperson. Als Resultat der Faktoranalyse wird die Matrix der Faktorbelastungen erhalten, die die Struktur des aus einzelnen Subsystemen bestehenden Steuerungssystems bestimmt. Während der Tätigkeit vereinen sich die Subsysteme zu einem Einheitsteuerungssystem. Mit Hilfe eines speziellen die Methode der Diskriminantenanalyse anwendenden mathematischen Apparates abwenden zwei Komponenten des Steuerungsprozesses, die Anpassungskomponente und die homeostatische Komponente (L1, L2), bestimmt. Die erste charakterisiert die auf die Anpassung des Organismus an die sich verändernden Umweltbedingungen ausgerichteten Prozesse. Zweite ist mit der Sicherstellung des Gleichgewichts (Homeostase) innerhalb des Organismus verbunden. Die Bestimmung konkreter Bedeutungen der homeostatischen und Anpassungskomponenten Ermöglicht in der standardisierten Form die Veränderungen des funktionalen Zustandes im Tätigkeitsprozess darzustellen und die funktionellen Zustände verschiedener Testpersonen in unterschiedlichen Zeitabschnitten unter verschiedenen Arbeitsbedingungen zu vergleichen. Auf der Grundlage der Analyse der Parameter L 1 und L 2 können folgende funktionale Zustände der Versuchspersonen diagnostiziert werden :

- 1) **Erhöhung der Aktivität des Regulationssystems** (Arbeitsanstrengung) wird von gleichzeitigem Wachstum der homeostatischen und der Anpassungskomponente widergespiegelt. Die sumare Variabilität (SDNN, CV, MxDMn, HFav, LFav, VLFav) erhöht sich, während die Stabilität des Herzrhythmus (Erhöhung pNN50 und RMSSD, Senkung AMo) bei einer zeitgleichen Verschlechterung der homeostatischen Parameter (HR, SI, RSAI) sinkt.
- 2) **Funktionale Anstrengung** äußert sich in einer Senkung der Anpassungskomponente bei einem Wachstum der homeostatischen Komponente Während die summare Variabilität (SDNN, CV, MxDMn, HFav, LFav, VLFav) sinkt, erhöht sich die Herzrhythmusvariabilität (pNN50, RMSSD, AMo) bei einem Übergewicht zentraler Regulationsmechanismen. Dabei zeichnen sich drei Stufen funktionaler Anstrengung aus : a) gemäßigte, b) ausgeprägte, c) Überanstrengung. Bei einer ausgeprägten funktionalen Anstrengung werden Ausbleiben des Wachstums der homeostatischen Komponente oder Anfang deren Verringerung beobachtet Diese Stufe kann als **kompensierte Ermüdung** angesehen werden.
- 3) **Aktivierung des autonomen Regulationskreises** ist eine Schutzreaktion des Organismus, dessen Kompensierungsreaktion, bei einer dauerhaften Einwirkung von Stressfaktoren. Sie äußert sich in dem Wachstum der Anpassungskomponente

und der Verringerung der homeostatischen Komponente. Dabei kommen Erhöhung der summierten Variabilität (SDNN, CV, MxDMn, HFav, LFav, VLFav) und gleichzeitige Senkung der Stabilität des Herzrhythmus (Erhöhung pNN50, und RMSSD, Senkung AMo), beim Wachstum homeostatischer Parameter (HR, SI, RSAI) zum Vorschein.

- 4) **Überanstrengung und Astenie (Erschöpfung) der Regulationsmechanismen** wird vom Sinken beider Komponenten des funktionalen Zustandes begleitet. Dabei verringert sich die Herzrhythmusvariabilität, seine Stabilität wächst rasch, die Pulsfrequenz erhöht sich RSAI steigt.

Die genannten funktionalen Zustände sind, im Grunde genommen, Stufen des Anpassungsprozesses der Testperson bei der Erfüllung der Arbeit unter einer bestimmten Arbeitsbelastung. Die Anwendung des Systemansatzes gibt die Möglichkeit einer kompakten quantitativen Beschreibung unterschiedlicher funktionaler Zustände der testierenden Personen. Für diesen Zweck ist unter anderem die Anwendung der **Methode des Phasenbildes** (in Eng. Phase Portrait) sehr effektiv.

Diese Methode ist auf der Abbildung 2 [Abb.2 Phasenbild der funktionalen Zustände der Testperson in verschiedenen Zeitabschnitten bei der Arbeit] , wo die Werte der homeostatischen und der Anpassungskomponente des funktionalen Zustandes der Person in verschiedenen Zeitabschnitten während der Arbeit angegeben sind, dargestellt. Die Anpassungskomponente ist als L 1 bezeichnet. Deren Erhöhung spiegelt das Wachstum der Parameter der Herzrhythmusvariabilität wider, was als Verringerung der Aktivität der Regulationsmechanismen bewertet wird. Die homeostatische Komponente ist als L 2 bezeichnet. Deren Erhöhung spiegelt die Erhöhung der Herzfrequenz, RSAI, wider, d.h. charakterisiert die Erhöhung des Funktionierungsniveaus des Herz- und Kreislaufsystems. Auf der X-Achse sind die Werte der Anpassungskomponente und auf der Y-Achse die der homeostatischen Komponente platziert. Der funktionale Zustand der Testperson in jedem der 10 Zeitabschnitten ist als ein Punkt der Ebene dargestellt. Somit :

- a) spiegelt der obere rechte Quadrant das Wachstum von L 1 und L 2 (hohes Niveau des Funktionierens des Kreislaufsystems bei einer gesenkten Aktivität der Regulationsmechanismen, Zustand der gemäßigten funktionalen Anstrengung) wider,
- b) gibt der obere linke Quadrant die Senkung der Größe L 1 und die Erhöhung des Wertes L 2 (erhöhtes Niveau des Funktionierens vom Kreislaufsystem bei einer hohen Anstrengung der Regulationsmechanismen, Zustand der ausgeprägten funktionalen Anstrengung) wieder,
- c) spiegelt der untere linke Quadrant die Senkung von L 1 und L 2 (gesenktes Niveau des Funktionierens des Kreislaufsystems bei einer hohen Anstrengung der Regulationsmechanismen, Zustand der Überanstrengung) wider,
- d) gibt der untere rechte Quadrant das Wachstum des Wertes L 1 und die Verringerung der Größe L 2 (gesenktes Niveau des Funktionierens des Kreislaufsystems bei einer Senkung der Anstrengung des Regulationsmechanismus, Anschließern an den

Anpassungsprozeß des autonomen Steuerungskreises sowie der Hemmungszustände [Ermüdungszustände mit Schläfrigkeiterscheinungen] und der Erschöpfungszustände der Regulationsmechanismen) wieder.

Betrachten wir mal die Abbildung 2 etwas genauer. Hier weist das Wachstum der beiden Komponenten auf die Erhöhung der Aktivität des Steuerungssystems hin. Man sieht, dass im 2. Abschnitt beide Komponenten ihre Minima erreichen, was über die Verringerung der Möglichkeiten des Organismus bei der Einarbeitung zeugt. Im 3. Zeitabschnitt schließen sich die Anpassungsmechanismen aktiv an, was zur Verbesserung der Homeostase führt. In den Abschnitten 4, 5 und 6 fängt die Ermüdungsentwicklung an, was auf die Senkung der Anpassungskomponente und den Übergang der homeostatischen Komponente in die Zone der Negativwerte deutet. Nach der Pause (7. Zeitabschnitt) wird der optimale funktionale Zustand mit einem hohen Niveau der Anpassungsaktivität und guter Homeostase festgestellt. Während der weiteren Arbeit wird gutes Niveau der Homeostase beibehalten, die Aktivität der Anpassungsprozesse sinkt jedoch erheblich (Übergang in die Zone der negativen Werte).

Analyse der Wechselbeziehung der Parameter (Korrelationsanalyse) in verschiedenen Zeitabschnitten erlaubt, ein Gutachten über den Einfluss der Umweltfaktoren, r.a. der Tätigkeitsfaktoren, auf den Zustand der gesamten Gruppe der Testpersonen zu erstellen. Da die individuellen Eigenschaften der Versuchspersonen die mit deren Tätigkeit verbundenen Reaktionen erheblich verändern können, war es wichtig, eine Methode der Feststellung von Typenreaktionen der Testpersonen in jedem der Zeitabschnitte zu finden. Dazu werden die Parameter der Wechselbeziehung zwischen den Kennwerten verwendet. Starke Wechselbeziehungen des funktionalen Zustandes hin. Nach den Resultaten der Kreuzkorrelationsanalyse kann man bei einer entsprechenden Zusammenstellung der Parameter der Herzrhythmusvariabilität folgende Schlussfolgerungen ziehen :

- a) Zustand der funktionalen Anstrengung (Verstärkung der Wechselbeziehungen aller Parameter, u.a. HR, SD, SI, IC
- b) Zustand der Überanstrengung und der Anfangszeichen der Übermüdung (erhebliche Stärkung der Wechselbeziehung aller Parameter bei einer Schwächung der wechselseitigen Beziehungen innerhalb der Gruppe spektraler Kennwerte).
- c) Zustand der Übermüdung (Beibehaltung hoher Korrelationen zwischen den Parametern HR, SD, SI, IC und Schwächung derer Wechselbeziehungen mit den Kennwerten LF and VFL).
- d) Anfangszeichen der Erschöpfung von Regulationsmechanismen (Senkung der Korrelation zwischen den Parametern, insbesondere des Zusammenhangs zwischen HR, SD, SI und IC einerseits und den spektralen Kennwerten andererseits).

Die beschriebenen methodischen Ansätze bei der Bewertung der funktionalen Zustände der Testpersonen wurden im Rahmen langjähriger Forschungen auf dem Gebiet der Weltraummedizin und der donosologischen Diagnostik (2, 16, 23, 24) entwickelt

(R.M.Baevsky, A .R.Baevsky, M.M.Lapkin und andere, 1996, R.M.Baevsky, A.P.Berseneva, 1997).

Statistische Datenanalyse. Bei der Analyse der Testresultate wird man standardisierten statistischen Methoden der Feststellung der Zuverlässigkeit der Unterschiede auf der Grundlage der Stjudent-Kriterien verwendet. Bei der Bearbeitung der Daten werden die Standardstatistikpakete "Statistica" und BMDP sowie elektronischen Tabellen EXEL benutzt.

4. BEGRIFFE UND ABSKÜRZUNGEN

1. HRV (Heart Rate Variability)	Variabilität des Herzrhythmus
2. HR (Heart Rate)	Herzfrequenz (Pulsfrequenz)
3. HF (High Frequency)	Hochfrequenzkomponente des Frequenzspektrums
4. SHF	absoluter Wert der Hochfrequenzkomponente des Frequenzspektrums
5. HF% (Power of High Frequency Spectral Component in Relation to total Power)	relativer Wert der Hochfrequenzkomponente des Frequenzspektrums
6. Hfav (Power of High Frequency Spectral Component)	Leistung der Hochfrequenzkomponente
7. LF (Low Frequency)	Niederfrequenzkomponente des Frequenzspektrums
8. SLF	absoluter Wert der Niederfrequenzkomponente des Frequenzspektrums
9. LF% (Power of Low Frequency Spectral Component in Relation to total Power)	relativer Wert der Niederfrequenzkomponente des Frequenzspektrums
10. LFav (Power of Low Frequency Copponent)	Leistung der Niederfrequenzkomponente
11. VLF (Very Low Frequency)	sehr niedrige Frequenzkomponente des Frequenzspektrums
12. VLF%	relativer Wert der sehr niedrigen Frequenzkomponente
13. VLFav	Leistung der extrem niedrigen Komponente

Wissenschaftlicher Bericht

(Power of very Low Frequency Component Power)	
14. VLF (Ultra Low Frequency)	extrem niedrige Frequenzkomponente des Frequenzspektrums
15. M (Mean)	Mittelwertabweichung
16. SE	Fehler der Mittelwertabweichung
17. NN50count	Anzahl der Abweichungen der RR-Intervalle, deren Wert größer als 50 msec ist
18. pNN50count (Number of successive RR-intervals with differences more than 50 ms in % to all NN)	Anzahl der Abweichungen der RR-Intervalle in % von der Gesamtzahl der Intervalle
19. SD (Standard Deviation)	Mittel-Quadratische Abweichung (Standardabweichung)
20. SDDSD (SD of Successive Differences)	Mittel-Quadratische Abweichung der Reihe der dynamischen Abweichung
21. RMSSD (Root Mean of Sum Successive Deviations)	Quadratwurzel der Summe der Abweichungsquadraten
22. IC (Index of Centralization)	Index der Zentralisation
23. CV (Coefficient of Variation)	Variationskoeffizient
24. SI (Stress Index)	Spannungsindex (Streßindex)
25. Slope	Logarithmus der Relationswerte zwischen der Atmungs- und Niederfrequenzwellen
26. Mo (Mode)	Modus (Modalwert)
27. Amo (Amplitude Mode)	Modusamplitude
28. MxDMn (Difference between Maximal and Minimal Value)	Variabilitätsmaß
29. RSAI (Regulatory System Activity	Aktivierungsindex des Regulationssystems

Index)

30. L1

Anpassungskomponente
des funktionalen Zustandes

31. L2

homeostatische Komponente
des funktionalen Zustandes

32. FZ

funktionaler Zustand

33. ISCA (Index of Subcortical
Centers Activity)

Index der Aktivierung
der subkortialen Zentren

Abb. 1

Abb. 2

Literatur

In Russisch

Anochin P.K. Essay on Physiology of functional systems. M., Medicina, 1975, 448 p.

Baevsky R.M., Baevsky A.R., Lapkin M.M., Semenov Y.N., Shalkin P.V. Medical and physiological aspects of hard-software development for heart rate variability analysis – Rossijskij mediko-biologicheskij vestnik, 1-2 n. 104-113, 1996

Baevsky R.M., Berseneva A.P. Valuation of body adaptability and risk of development of diseases. M., Medicina, 1997, 236 p

Baevsky R.M., O.I. Kirillov and S.Z. Kletckin. Mathematical analysis of heart rhythm in stress. Moscow, Science, 225 p., (1984)

Baevsky R.M., Kudrjavceva V.I. Peculiarities of heart rhythm regulation during mental work. *Physiologia cheloveka*. 1975, v.I. 2 p. 299-302

Baevsky R.M., Ioseliani K.K., Poljakova O.M. General principle of functional state of persons-operators valuation during work. In *Medical informatics systems*, Taganrog, 1988 p. 58-63

Baevsky R.M., Semenova T.D. Valuation of functional state of operator in sensoric failure conditions. *Physiologia cheloveka*, 1986, 4 p. 76

Egorov A.S., Zagradsky V.P. *Psychophysiology of mental work*. L., Nauka, 1973, 131 p.

Zemaitite D. Possibility of clinical using and automatic analysis of rhythmograms Autoref. doct. dissert. Kaunas, 1972, 39 p.

Karpenko A.V. Catecholamins excretion with urina and heart rhythm structure during mental work with different strain. Autoref. of dissert. med. cand., Kiev, 1977, 21 p

Kapezhenas A., Zemaitite D. Dependence of the heart rhythm structure from physical adaptability of sportsmen. *Physiologia cheloveka*, 1983, 5, v.8, p 729-734

Kudrjavceva V.I. To question of mental fatigue forcasting Autoref. of dissert. med. cand. V., 1974, 22 p

Lazarus R. Theory of stress and psychophysiologic investigations. In *Emotional stress*. L., 1978, 212 p

Leonova A.B. *Functional psychodiagnostic of states*. M., 1984, 156 p.

Medvediev V.I. Functional state of human head brain. In – *Mechanismus of brain activity*. Human Neurophysiology. L., Nauka, 1988, v.I., p. 300- 357

Parin V.V., Baevsky R.M. *Introduction in medical cybernetics* M., Medicina, 1966 278 p.

Rosenblat V. V. The problem of fatigue. M., Medicina 1975, 240 p

Selye H. Essay about adaptation syndrom, M., Medgiz., 1960, 207 p

Chaspekova N.B., Alieva H.K., Djukova G.M. Valuation of the sympathetic and parasymphathetic mechanisms during autonomic parocsisms. Sov. Medicina, 1979, 9, 25-28 p

In English

Akselerod S., Gordon D., Madwed B. et al. Hemodinamic regulation investigations by special analysis. Am. J. Physiol., 1985, 247, 857-675

Bugard P. Les difficultes de probleme de la fatigue. Rew. Path. gen. 1960,N 716, p. 337-346

Heart rate variability. Standards of Measurement, Physiological Interpretation and Clinical Use. Circulation, 93, 1043-1065,1996

Lichner M., S., S. Akselrod, V.M Avi et al. Spectral analysis of heart rate fluctuations. A non-invasive method for the early diagnosis of autonomic neuropathy in diabetes mellitus. J. Autonom. Nerv. Syst, 1987, 19, pp. 119 – 125

Lipsitz L.A., J. Mietus, G.B.Noody, A .L .Goldberger. Spectral characteristics of heart rate variability before and during postural tilt relations to aging and risk of syncope. Circulation, 1990, pp. 81 :1803 – 1810.

Ludwig C. Arch.Anat.Physiol.Wis.Mol., 1847, p.242 – 302

Pagani M., Lombardi F., Guzzatto S. et al. Power spectral analysis of heart rate and artial presure variabilites as a marker of sympatho-vagal interaction in man and conscious dogs. Circ.Res. : 1986 :59 :178 – 193

Pomeranz B., Macauley R., Caudil M. Assessment of automatic function in humans be heart rate spectral analysis. Am.J.Physiol., 1985 :248 :151-153

Polakova O., Baevsky R., Roytburg Y. Cardiac rhythm spectral analysis to estimate psychologic stress and mental exhaustion. First European Conference on biomedical Engineering – 17 – 20 February 1991 – nice – RBM – 1991 – 13 – 1, p. 283 –284

Paty J., Morault P., Berthomieu J. Fatigue, somnolence et sommeil – Bull-Acad-Natl-Med. 1994 Jun, 178(6) : discussion 1105-9

Wissenschaftlicher Bericht

Rokicki S.M. Psychophysiological measures applied to operational test and evaluation. – Biol-Psychol. 1995 May 40(1-2) :223-8

Van Ravenswaaij C.M.A, Kollee L.A, Hopman J.C.V a oth, Heart rate variability (review)//Annals of Internal Med. 1993 : 118, 436 –447.

Sawyers B. Analysis of heart rate variability. Ergonomics – 1973 –V.16 –N.1 –p.17-32

Wierwille W.W., Ellsworth L.A. Evaluation of driver drowsiness by trained raiters. – Accid – Anal – Prev. 1994 Oct, 26(5) : 571 –81

Übersetzung aus der russischen in die deutsche Sprache und Bearbeitung von Ekaterina Kochueva, Berlin, April 1999