

УДК 61:370.321.7

## СТРУКТУРНО-ЛІНГВІСТИЧНИЙ АНАЛІЗ РЕАКЦІЙ ОРГАНІЗМУ ЛЮДИНИ НА ФІЗИЧНЕ НАВАНТАЖЕННЯ

**В.М. Ільїн, Л.І. Черкес, С.Б. Коваль, Г.В. Коробейніков**

*Національний університет фізичного виховання і спорту*

Запропонований новий підхід до оцінки реакцій організму людини на фізичне навантаження, що ґрунтується на структурно-лінгвістичному аналізі спектрограм варіабельності серцевого ритму, традиційних уявленнях про регуляторні системи організму і теорії ультрастабільності. Під час зовнішніх впливів і спонтанно за певними правилами функціональні стани організму змінюються. Такі стани і правила переходів між ними можуть бути класифіковані і описані за допомогою спектральних формул, хвильових чисел і статистичних даних.

**Ключові слова:** ультрастабільна система, структурно-лінгвістичний аналіз, дискретний стан, правила переходів, фізичне навантаження.

## СТРУКТУРНО-ЛИНГВИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕАКЦИЙ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА НА ФИЗИЧЕСКУЮ НАГРУЗКУ

**В.Н. Ильин, Л.И. Черкес, С.Б. Коваль, Г.В. Коробейников**

*Национальный университет физического воспитания и спорта, Киев, Украина*

Предложен новый подход к оценке реакций организма человека на физическую нагрузку, основанный на структурно-лингвистическом анализе спектрограмм вариабельности сердечного ритма, традиционных представлениях о регуляторных системах организма и теории ультрастабильности. При внешних влияниях или спонтанно по определенным правилам функциональные состояния организма изменяются. Эти состояния и правила переходов между ними могут быть классифицированы и описаны с помощью спектральных формул, волновых чисел и статистических данных.

**Ключевые слова:** ультрастабильная система, структурно-лингвистический анализ, дискретное состояние, правила переходов, физическая нагрузка.

## STRUCTURAL-LINGUIST ANALYSIS OF HUMAN ORGANISM REACTION ON PHYSICAL LOADING

**V.M. Ilyin, L.I. Cherkes, S.B. Koval, H.V. Korobeynikov**

*National University of Physical Education and Sport of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

A new approach to estimation of human adaptation reaction during physical loading is proposed. It is based on the structural-linguistic method, traditional notions of the body regulatory systems and views that human organism is the ultrastable system, which could exist only in discrete states. Under outer influences or spontaneously the transition between human organism states occurs not continuously but rather by steps according to certain rules. These conditions and transition rules can be classified and described by spectral formulas, wave formulas and statistical data.

**Key words:** ultrastable system, structural-linguists method, discrete state, transition rules, physical loading.

**Вступ.** У глобальній проблемі взаємодії людини з навколишнім середовищем особливе місце займають процеси адаптації організму до екстремальних чинників, у тому числі значних фізичних навантажень, що характерні для спорту найвищих досягнень. Ці процеси можуть мати найрізноманітніший характер і торкатися усіх сторін регуляції його функцій та жит-

тєдільності [1-3]. Для кожного організму є сукупність фізіологічних та функціональних показників, які пов'язані між собою і мають близьке відношення до виживання цього організму. Ці показники (число їх може бути значним) називаються істотними змінними [7, 8]. Саме сталість цих змінних, коли вони не виходять за фізіологічні межі, визначає адаптивну

поведінку організму. Під час адаптивної поведінки біологічні системи не тільки саморегулюються, але й ще пристосовуються за рахунок існування двох типів зворотного зв'язку. Первинний зворотний зв'язок реалізується через сенсорні та виконавчі системи, наприклад, зорову і рухову системи, і вони визначають поточну поведінку живого організму при адекватному зовнішньому середовищі, не змінюючи своєї характеристики. Другий зворотний зв'язок, котрий діє дискретно і зі швидкістю набагато більш низького порядку, реалізується за рахунок впливу зовнішнього середовища на істотні змінні, які необхідно утримувати в певних межах. Останні, в свою чергу, впливають на певні ступінчасті механізми так, що вони включаються тоді і тільки тоді, коли істотні змінні виходять за рамки заданих меж. Ступінчасті механізми діють на виконавчу ланку організму, при цьому зміна параметра, як правило, веде до якоїсь зміни стабільності організму. В свою чергу, зміна стабільності організму може бути обумовлена тільки змінами величин параметрів. Два типи зворотного зв'язку визначають ультрастабільність системи, яка полягає в тому, що система може знаходитися не в одному стані, а у різних, і переходи між ними визначаються ступінчастими змінами параметрів.

Концепція ультрастабільності відображає загальний принцип організації живих систем і покладена в основу нового підходу до оцінки функціонального стану організму людини і його адаптивної поведінки при дії екстремальних факторів, у тому числі і значних фізичних навантажень. В ньому об'єднані традиційні уявлення про регуляторні системи організму і положення про те, що організм людини являє собою ультрастабільну систему [4-5, 8]. Згідно з сучасними даними, в організмі існує декілька ієрархічних організованих систем регуляції, які можуть бути відповідальні за зберігання внутрішнього гомеостазу, а також за перехід організму у новий стабільний стан при зовнішніх або внутрішніх впливах, забезпечуючи тим самим його адаптивну поведінку [2].

Дослідження, що проводилися протягом останніх трьох десятиріч, довели, що індикатором стану цих регуляторних систем і, отже, стану всього організму може бути ритм серця, точніше його статистичні або спектральні характеристики [2, 4, 5, 9, 10]. Проте при традиційному аналізі змін в частотній і хвильовій структурах ритму серця при дії різних факторів зовнішнього середовища недостатньо повно враховується комплекс змін форми спектрів потужності ритму серця, а також закономірності їх трансформації.

На основі математичного аналізу ритмокардіограм, що зареєстровані за звичайними та екстремальними

впливами, доведено наявність статистично достовірно різних класів ритмокардіограм та їх спектрів потужності, які відображають окремі дискретні стани, в котрих може знаходитися організм. Статистичні характеристики ритму серця (насамперед частота серцевих скорочень або тривалість R-R інтервалів) і фізіологічні показники основних систем організму (дихання і кровообіг) є істотними змінними, які необхідно утримувати у певних для кожного окремого стану організму межах. В якості параметрів приймаються співвідношення спектральних потужностей основних періодичних компонентів ритму серця, які відображають активність певних каналів або ланцюгів регуляції функцій організму. Якщо зовнішній вплив не є для організму стресорним, тоді організм знаходиться у одному із стабільних станів невизначено довго, відповідаючи на ці впливи зміною своїх істотних змінних в заданому для цього стану діапазоні. При цьому співвідношення спектральних компонентів ритму серця не змінюються. При стресорних впливах, коли регуляторні системи в даному поєднанні не здатні утримати істотні змінні в певних для цього стану рамках, включаються деякі ступінчасті механізми, які переводять організм у новий стан, що характеризується іншою координацією різних каналів або ланцюгів регуляції вегетативних функцій та іншим діапазоном змін істотних змінних. При цьому у організмі може бути стільки *стабільних форм поведінки або станів, скільки поєднань можуть утворити різні значення спектральних компонентів ритму серця, відображаючи активність окремих каналів або ланцюгів регуляції функцій організму.*

Мета дослідження - аналіз адаптаційних реакцій організму людини на впливи екстремальних чинників, у тому числі фізичного навантаження, за допомогою структурно-лінгвістичного опису змін хвильової структури ритму серця. Використання цього методу дозволяє спростити опис вихідних даних, зберігаючи при цьому найбільш суттєві властивості інформації, яка утримується у цих даних. Головна мета лінгвістичних методів - утворення дуже простої мови з невеликим словником і дуже простими правилами упорядкування фраз, але водночас такої мови, яка дозволяє коротко описувати кожний стан організму, який виділяє саме істотні закономірності змін цих станів.

**Результати дослідження та їх обговорення.** На першому етапі аналізу розглядалися відношення трьох основних спектральних компонентів в низько-, високо- і надвисокочастотній областях ритму серця, які є традиційними при оцінці стану регуляторних систем організму [2, 6, 9, 10]. У символній формі низь-

кочастотну (0,04-0,15 Гц) компоненту можна записати як Sm, високочастотну (0,15-0,40 Гц) - Sb, надвисокочастотну (0,40-1,00 Гц) - Sf. Спектральною формулою названа послідовність символів, що характеризують наявність спектральних ліній та їх амплітудні співвідношення у спектрі потужності ритму серця. Наприклад, коли у спектрі відсутні максимуми (спектральні лінії), то у символній формі спектральну формулу можна записати як So. Коли максимуми наявні тільки в одній із частотних областей, то ці спектри можливо відповідно записати як Sm, Sb або Sf. Коли є максимуми у двох із трьох частотних областей, то вони записуються у вигляді: SmSb, SmSf, SbSm, SbSf. При цьому перша компонента має найбільшу амплітуду. Трикомпонентні спектри записуються у вигляді SmSbSf, SmSfSb, SbSmSf, SbSfSm, SfSm, SfSb, SfSmSb і SfSbSm.

Організм, як ультрастабільна система, може знаходитись у рівноважному стані при певних співвідношеннях спектральних компонентів. Стабільними або рівноважними відношеннями будуть ті, у яких спектри ритмокардіограм описуються наступними формулами: So, Sm, Sb, SmSb, SbSm. Квастаціонарні стани мають спектри з формулами Sf, SmSf, SbSf, SfSm, SfSb, SmSbSf, SmSfSb, SbSmSf, SbSfSm, SfSmSb,

SfSbSm. Основною ознакою квазістаціонарного стану є наявність в спектрах кардіоінтервалограм високоякісного компонента Sf. Спектри кардіоінтервалограм можна класифікувати за допомогою спектральних індексів. Спектральний частотний індекс (L) відповідає числу частотних діапазонів у спектрі кардіоінтервалограми, в якій присутні максимуми (спектральні лінії). Коли максимуми у спектрі відсутні, то L=0. Коли максимуми спостерігаються тільки в низько-, високо- або надвисокочастотному діапазоні, то L=1. Коли максимуми спостерігаються в будь-яких двох із трьох діапазонів (низько- і високочастотному, низько- і надвисокочастотному або високо- і надвисокочастотному), то L=2. Коли максимуми присутні водночас у всіх трьох частотних діапазонах, то L=3. Спектральний комбінаторний індекс (K) характеризує комбінацію спектральних максимумів і може приймати значення від 1 до 6, але він характеризується деякою невизначеністю, бо залежить від вихідного стану організму.

Є 16 основних станів організму, котрі можна описати за допомогою спектральних формул, індексів і чисел, характеризуючи кількість і амплітудні співвідношення спектральних компонентів ритму серця. У таблиці 1 наведено перелік можливих станів організму, а

**Таблиця 1.** Класифікація 16 функціональних станів організму людини, що базується на структурно-лінгвістичному аналізі і теорії ультрастабільності

Стаціонарні стани	Квастаціонарні стани	
	Стійкі	Нестійкі
So (L=0, K=1÷6)	SmSf (L=2, K=2, 6)	Sf (L=1, K=3÷5)
Sm (L=1, K=1, 2, 6)	SbSf (L=2, K=3, 5)	SfSm (L=2, K=3, 5)
Sb (L=1, K=2, 3, 5, 6)	SmSbSf (L=3, K=1)	SfSb (L=2, K=4)
SmSb (L=2, K=1)	SbSmSf (L=3, K=2, 6)	SfSmSb (L=3, K=3, 5)
SbSm (L=2, K=2, 6)	SmSfSb (L=3, K=2, 6)	SfSbSm (L=3, K=4)
	SbSfSm (L=3, K=3, 5)	

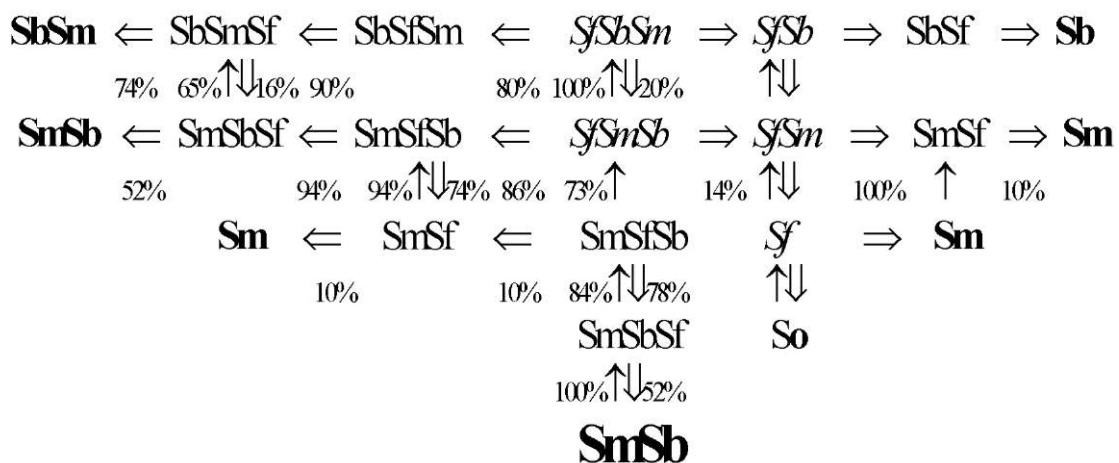
також відповідні їм значення спектральних L і K індексів. So - спектри ритмокардіограм, для яких характерна відсутність періодичних складних і, отже, відсутність спектральних максимумів. Вони спостерігаються під час деяких патологічних процесів [2]. Спектри Sm характерні для стабільних станів з більш високим енергетичним рівнем. Вони відзначаються

у осіб з недостатністю адаптаційних механізмів, які нездатні забезпечити оптимальну реакцію організму на вплив зовнішніх факторів. З цього стану можливі переходи як на більш низький енергетичний рівень So, так і на більш високі енергетичні рівні Sb, SmSb і SbSm. Спектри Sb відмічаються у осіб з високими енергетичними і функціональними резервами, які за-

безпечують повну адаптацію до факторів зовнішнього середовища при оптимальному напруженні регуляторних систем організму [2, 4]. Ці стани дуже стійкі і для їх досягнення потрібна найбільша кількість вимушених і спонтанних переходів. Найчастіше зустрічаються спектри SmSb, які рееструються при станах повної або часткової адаптації організму до зовнішніх умов, які супроводжуються мінімальним напруженням регуляторних систем. Вони характерні для нетренованих осіб [2, 5]. Із цих станів можливі переходи як на більш низькі стабільні енергетичні рівні Sm, Sb і So, так і на більш високі - SbSm. Спектри SbSm характеризують стабільні стани у осіб з високим рівнем тренуваності, у котрих адаптація до фак-

торів зовнішнього середовища забезпечується за рахунок підвищення витрат енергетичних і структурних елементів в організмі [2, 6]. Із цього стану можливі переходи тільки на більш низькі стабільні енергетичні рівні. Зроблено припущення, що при переходах із одного функціонального стану в інший, або *спектральний частотний* (L), або *комбінаторний* (K), *індекси* повинні змінюватись не більш як на 1, тобто або DL=1 і DK=0, або DL=0 і K=1. Поміж станами можливі 48 і переходів, які проходять за певними правилами (схема. 1). У той же час слід відзначити, що наслідком невизначеності індексу K можуть бути порушення правил переходу і, таким чином, збільшення кількості можливих переходів.

Схема 1. Дозволені переходи поміж 16 функціональних станів організму



**Примітка :** → - вимушені переходи; ⇒ - спонтанні переходи; жирним шрифтом позначені стаціонарні стани; курсивом - нестійкі квазістаціонарні стани; в процентах наведена кількість переходів даного типу, що спостерігались під час експериментів і співпадали з теоретичним прогнозом.

Теоретичний аналіз реакцій організму на вплив зовнішнього середовища різної інтенсивності і тривалості, який зроблено з урахуванням основних положень концепції про ультрастабільність організму, визначив основні закономірності цих реакцій, які залежать від початкового стану регуляторних систем організму, а саме реакції організму будуть визначатися:

- інтенсивністю і тривалістю зовнішнього впливу;
- характером впливу, який вибірково активує певні ланцюги або механізми в системі регуляції;
- початковим станом регуляторних систем;
- правилами переходів поміж станами.

Важливим наслідком теоретичного аналізу реакцій організму людини як ультрастабільної системи є те, що коли організм знаходиться в одному із квазістаціонарних станів зі спектрами SmSfSb, SbSfSm, то навіть при слабких зовнішніх збуреннях можливий перехід в нестійкі квазістаціонарні стани зі спектрами SfSm, SfSmSb, SfSb, и SfSbSm, із котрих, у свою

чергу, можливі спонтанні переходи у стани зі спектрами So и Sm, які характеризуються функціональним напруженням, перенапруженням або виснаженням регуляторних механізмів (рис. 1).

На першому етапі аналізу стани організму можна описувати різними співвідношеннями спектральних потужностей тільки трьох періодичних компонентів, тобто аналізується груба структура спектра потужності ритму серця. В той же час, в більшості спектрів ритму серця є тонка структура. Низько-, високо- і надвисокочастотні області можуть мати окремі компоненти Sm<sub>i</sub>, Sb<sub>j</sub> и Sf<sub>k</sub>, кількість котрих (i, j, k), а також їх амплітудні (Am<sub>i</sub>, Ab<sub>j</sub> и Af<sub>k</sub>) і частотні (fm<sub>i</sub>, fb<sub>j</sub> и ff<sub>k</sub>) характеристики залежать від стану регуляторних систем і всього організму в цілому. Добре описані і застосовуються для оцінки стану регуляторних систем організму максимумами першого і другого порядків в низькочастотній області спектра, які ще мають назву повільні хвилі [2]. Також часто спосте-

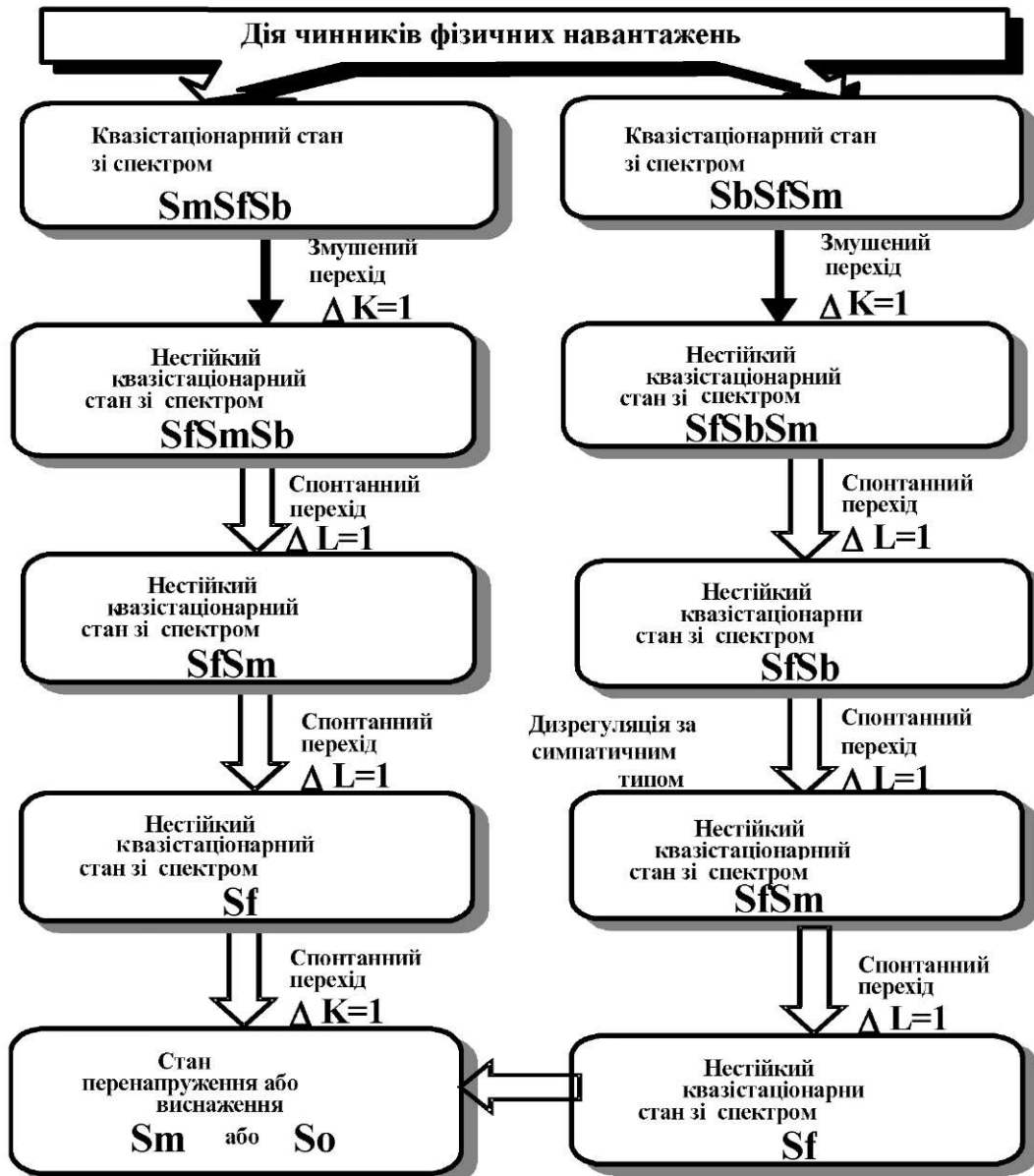


Рис. 1. Схеми змін станів організму як ультрастабільної системи під час дії факторів фізичного навантаження.

рігаються розщеплення спектральних ліній у високо-частотній (дихальній) і надвисоко-частотній областях (рис. 2). У середньому, у стані відносного спокою реєструються 8-15 максимумів у спектрі потужності ритму серця. При такій кількості спектральних максимумів значно збільшується кількість їх можливих поєднань і, отже, станів організму і переходів між ними, що істотно розширює можливості аналізу і прогнозу змін станів організму при зовнішніх впливах. Для характеристики тонкої структури спектра потужності ритму серця упроваджуються хвильові числа. *Низькочастотне хвильове число* (а) відповідає кількості максимумів або спектральних ліній (повільних хвиль всіх порядків) в низькочастотному діапазоні і може приймати значення 0, 1, 2, 3 ... і. *Висо-*

*кочастотне хвильове число* (d) відповідає кількості максимумів у високо-частотному діапазоні (дихальні хвилі і спряжені з ними) і може приймати значення 0, 1, 2, 3 ... j. *Надвисоко-частотне хвильове число* (b) відповідає кількості максимумів у надвисоко-частотному діапазоні і може приймати значення 0, 1, 2, 3 ... k. Загальне хвильове число (S) відповідає кількості спектральних максимумів в усьому частотному діапазоні і може приймати значення 0, 1, 2, 3 ... (i+j+k). Чим більше S, тим вища активність регуляторних систем, тим більше енергія, витрачена на підтримку даного стану. Загальне хвильове число відповідає ступеням свободи основного стану, які можуть приймати значення 0, 1, 2, 3 ... (i+j+k). Чим більше ступенів свободи, тим менше зв'язку поміж окреми-

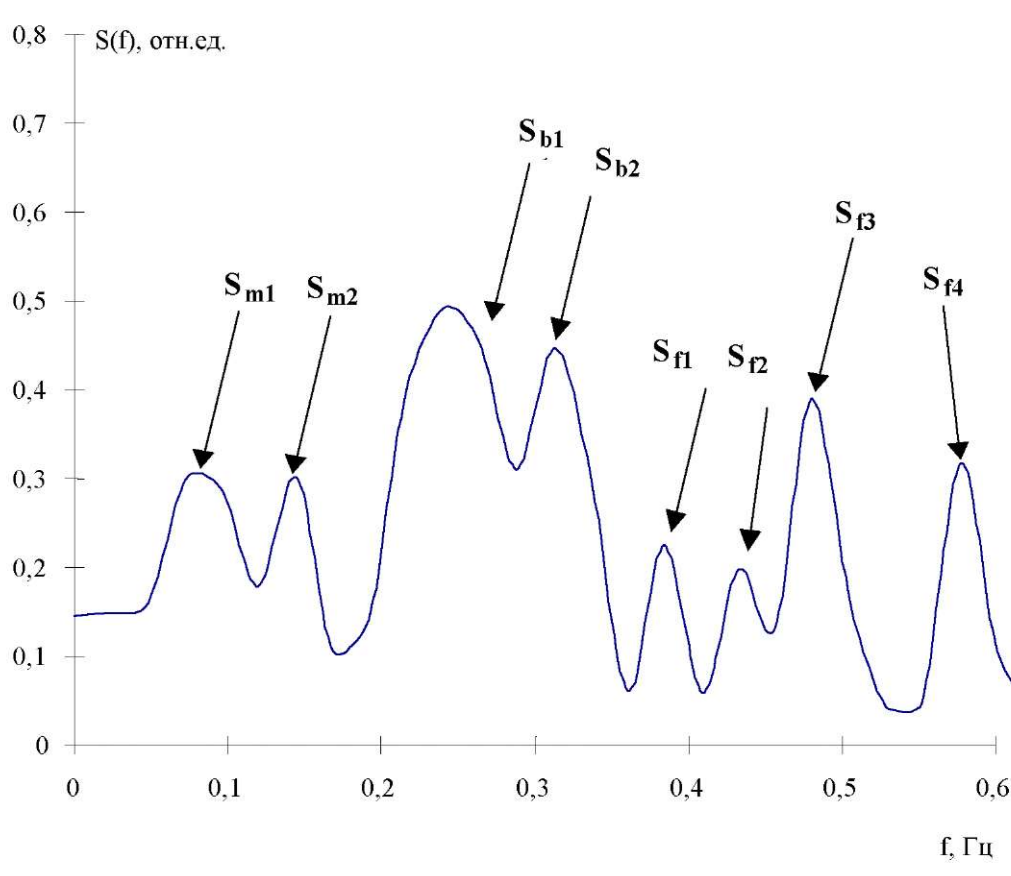


Рис. 2. Тонка структура спектра потужності ритму серця, що має формулу  $S_b(2)S_f(4)S_m(2)$ .

ми рівнями і ланцюгами регуляторної системи, тим більша кількість переходів між підстанами в межах основного стану і більша можливість переходу в інший основний стан. *Ультрастабільна система* з більшою кількістю ступенів свободи (високим загальним хвильовим числом) швидко приходить до рівноваги і форма її поведінки більш адаптивна, але вона менш стабільна. Багатокомпонентні квазістаціонарні стани, які мають великі загальні хвильові числа, характеризуються меншим часом життя, ніж основні стани.

Для кожного основного стану повинні існувати певні значення *спектральних індексів* ( $L, A$ ) і *хвильових чисел* ( $a, d, b, S$ ), при яких спостерігається оптимальне відношення між ступенем адаптивності і стабільністю. З віком загальне хвильове число ( $S$ ) і енергетичні рівні основних станів знижуються, і, таким чином, погіршується здатність живого організму до адаптації.

**Висновок.** Концепція ультрастабільності живого організму та структурно-лінгвістичний метод дають нові можливості для оцінки функціонального стану організму людини, а також вивчення і прогнозування спільних і індивідуальних особливостей адаптації до екстремальних впливів, у тому числі і фізичних навантажень. Цей підхід може використовуватися для визначення загальних і індивідуальних особливостей змін функціонального стану основних вісцеральних систем організму спортсмена при фізичних навантаженнях різної інтенсивності, прогнозування індивідуальної стійкості організму до впливу комплексу екстремальних чинників у різних видах спорту, розробки засобів контролю і управління тренувальною і спортивною діяльністю, а також для прогнозування, діагностики, профілактики і корекції пре- і патологічних синдромів, які виникають при тривалому стресорному впливі [4, 5].

#### Література

1. Агаджанян Н. А. Хроноархитектоника биоритмов и среда обитания / Агаджанян Н.А., Гуюин Г.Д., Губин Д.Г.,

Радыш И.В. - Тюмень: Изд-во Тюменского гос. университета, 1998. - 168 с.

2. Баевский Р.М. Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе / Баевский Р.М., Кириллов О.И., Клецкин С.З. - М.: Наука, 1984. - 221 с.
3. Гаркави Л.Х. Адаптационные реакции и резистентность организма / Гаркави Л.Х., Квакина Е.Б., Уколова М. А. - Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 1990. - 223 с.
4. Ильин В.Н. Организм человека как ультрастабильная система / Ильин В.Н., Иванов А.Б. // Известия КБНЦ РАН. - 1999. - № 2. - С. 69-74.
5. Ильин В.Н. Применение теории ультрастабильных систем для оценки функционального состояния организма человека / Ильин В.Н. // УСиМ. - 2000. - № 1. - С.14-19.
6. Сапова Н.И. Регуляция сердечного ритма человека в комфортных и экстремальных условиях: автореф.дисс на соискание научн. степени д-ра мед. наук: спец. 03.00.13 / Н.И. Сапова - Санкт-Петербург, 1992. - 48 с.
7. Шумаков В.И. Моделирование физиологических систем организма / Шумаков В.И., Новосельцев В.Н., Сахаров М.П., Штенгольд Е.Ш. - М.: Медицина, 1971. - 352 с.
8. Эшби У.Р. Конструкция мозга / Эшби У.Р. - М.: Изд. иностранной литературы, 1962. - 398 с.
9. Akselrod S., Gordon D., Ubel F.A., Shannon. C., Barger A.C., Cohen R.J. Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: a quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control / Science-1981. - Vol. 213, №4504. - P. 220-222.
- Lipsitz L.A., Mictus J., Moody G.B., Goldberger A.L. Spectral characteristics of heart rate variability before and during tilt: Relations of aging and risk of syncope // Circulation. - 1990. - Vol. 81, №6. - P. 1803-1810.