

СПОСІБ ОТРИМАННЯ СЕНСОМОТОРНИХ КОЛИВАНЬ В УМОВАХ ВИСОКОГІРНОЇ ГІПОКСІЇ

Ю.В. Кравченко¹, В.Н. Ільїн², Л.В. Чернокоза³, М.М. Михайлович³

¹ Міжнародний центр астрономічних і медико-екологічних досліджень НАН України, Київ

² Національний університет фізичного виховання і спорту України, Київ

³ Чернівецький національний університет ім. Ю.Федьковича

Пропонується алгоритм методики, що дозволяє моделювати зосереджені, передстресові і стресові функціональні робочі стани (ФРС) головного мозку залежно від ступеня сенсомоторного навантаження (першосигнальні позитивні і гальмівні подразники) в умовах високогірної гіпоксії, визначати основні властивості нервових процесів і аналізувати хвилову структуру сенсомоторних коливань методом параметричного спектрального аналізу.

Ключові слова: сенсомоторне навантаження, високогірна гіпоксія, функціональні стани головного мозку.

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ СЕНСОМОТОРНЫХ КОЛЕБАНИЙ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГОРНОЙ ГИПОКСИИ

Ю.В. Кравченко¹, В.Н. Ильин², Л.В. Чернокоза³, М.М. Михайлович

¹ Международный центр астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины, Киев

² Национальный университет физического воспитания и спорта Украины, Киев,

³ Черновицкий национальный университет им. Ю.Федьковича

Предлагается алгоритм методики, которая позволяет моделировать сосредоточенное, предстрессовое и стрессовое функциональные рабочие состояния (ФРС) головного мозга в зависимости от степени сенсомоторной нагрузки (первосигнальные положительные и тормозные раздражители) в условиях высокогорной гипоксии, определять основные свойства нервных процессов и анализировать волновую структуру сенсомоторных колебаний методом параметрического спектрального анализа.

Ключевые слова: сенсомоторная нагрузка, высокогорная гипоксия, функциональные состояния головного мозга.

METHOD OF OBTAINING SENSOMOTOR FLUCTUATION UNDER CONDITIONS OF ALPINE HYPOXIA

Yu.V. Kravchenko¹, V.N. Ilyin², L.V. Chornokoza³, M.M. Mykhaylovych

¹ International Centre of Astronomic and Medical-Ecological Researches of NAS of Ukraine, Kyiv

² National University of Physical Education and Sports of Kyiv

³ Chernivtsi National University by Yu. Fedkovych

The given computer procedure automatically allows us to watch functional working states of the brain (FWSB) in dependence on nervous system activation under the sensomotor loading (firstsignal positive and brake stimuli). The program defines main properties of nervous processes, WFSL, a level of function mobility of nervous processes, force of nervous processes, efficiency of brain, balance of nervous processes by method of parametrical spectral analysis.

Key words: sensomotor loading, Alpine hypohia, functional states of brain.

Вступ. Порушення функції нервової системи при високогірній гіпоксії починається в сфері вищої нервової діяльності (ВНД і виявляється в розбалансуванні найбільш складних аналітико-синтетичних про-

цесів. Істотний внесок у дослідження дії високогірної гіпоксії на ВНД людини зробили Н.Н. Сиротинін [1], А.З. Колчинська [2] та інші. Подальший розвиток цього напрямку може бути зв'язаний з розробкою нових методів визначення впливу високогірної гіпоксії на психомоторну діяльність при моделюванні функ-

ціональних робочих станів (ФРС) головного мозку (ГМ). У зв'язку з цим актуальним є одержання стійких показників основних і додаткових властивостей ВНД за результатами моделювання ФРС в умовах інтенсивного розумового навантаження. З описуваних Ю.П. Горго [3] функціональних робочих станів людини з погляду моделювання представляють інтерес 3 види: 1) зосереджений робочий стан на рівні функціональної рухливості нервових процесів (РФР НП) при максимально можливому стійкому режимі роботи із здійсненням 5 % помилок (ймовірність безвідмовної роботи $P_6=0,95$, ймовірність відмови $P_0=0,05$); 2) передстресовий робочий стан на рівні максимальної мобілізації сил (РММ) зі здійсненням 25 % помилок ($P_6=0,75$, $P_0=0,25$); 3) стресовий робочий стан на рівні максимально можливого функціонування нервових процесів або рівні стресу (ВРС), коли в 50 % випадків реєструються відмови при диференціюванні позитивних і гальмівних сигналів, які слідує один за одним ($P_6=0,5$, $P_0=0,5$), що одержало назву «нейродинамічний стрес» (НДС) [4, 5]. НДС є інформаційним стресом, що разом з емоційним стресом складають психологічний стрес, а останній, разом з фізіологічним, входять у найбільш загальну класифікацію поняття «стресу» [6].

Мета роботи: розробка методики фіксації сенсомоторних коливань і одержання кількісної оцінки ступеня адаптації до високогірної гіпоксії на підставі аналізу їхньої хвильової структури методом параметричного спектрального аналізу на початку і наприкінці перебування на високогір'ї.

Результати роботи і їхнє обговорення. В основу універсального алгоритму моделювання заданого ФРС людини покладений принцип зворотного зв'язку, коли правильна диференціація всіх сигналів поточної серії викликає збільшення швидкості представлення подразників наступної серії V_{i+1} на визначену величину ΔV

$$V_{i+1} = V_i + \Delta V \quad (1),$$

а при наявності помилки відбувається зменшення швидкості:

$$V_{i+1} = V_i - \Delta V \quad (2).$$

Зниження швидкості відбувається відразу після виявлення помилкової реакції, не чекаючи завершення поточної серії сигналів. Збільшення швидкості ΔV є нелінійною величиною і залежить від величини швидкості представлення поточної серії подразників:

$$\Delta V = (k\% \cdot V_i) / 100 \quad (3),$$

де $k\%$ - прийнятий відсоток зміни швидкості заданого ФРС. Емпірично встановлені значення $k\%$ для 3-х ФРС: $k_{\text{рфр}}^{\circ}/\circ = 5\%$, $k_{\text{умм}}^{\circ}/\circ = 2\%$, $k_{\text{ус}}^{\circ}/\circ = 1\%$. У цьо-

му випадку спостерігається плавна зміна частоти зміни сигналів у всьому робочому діапазоні та стійка робота на високих частотах представлення подразників, на відміну від випадку $\Delta V = \text{const}$. Кількість сигналів для кожної серії розраховується за формулою:

$$N = (2 \cdot P_0)^{-1} \quad (4).$$

У нашому випадку маємо $N_{\text{рфр}} = 10$, $N_{\text{умм}} = 2$, $N_{\text{ус}} = 1$. Початкова швидкість представлення подразників V_0 встановлюється залежно від конкретної задачі і для кожного обстежуваного підбирається індивідуально. Якщо за видом перехідного процесу необхідно оцінити динамічність НП, як додаткова властивість НП, що характеризує швидкість утворення тимчасових зв'язків і умовних рефлексів [7], то V_0 встановлюється нижче передбачуваної швидкості $V_{\text{уф}}$, що відповідає рівню функціонування для даного ФРС. Якщо на початку передбачається використовувати навантаження, що відповідає рівню функціонування, то встановлюється $V_0 = V_{\text{уф}}$. Прогнозований рівень функціонування визначається експериментально. Тобто можна індивідуально для кожного обстежуваного встановлювати початкову швидкість представлення сигналів, поставивши їх усіх у початкові рівні умови. V_0 для заданого ФРС розраховується виходячи з припущення, що обстежуваний протягом 30 с від початку роботи не зробив ні однієї помилки за формулою

$$V_0 = V_{\text{уф}} \cdot 2^{(1-k\%/100) \cdot n} \quad (6),$$

де n - розрахована кількість ітерацій:

$$n = \log_{(1-k\%/100)} (N / (V_{\text{уф}} \cdot 30)) \quad (7).$$

Серійний сигнал являє собою меандр (тривалість періодів експозиції і гасіння рівні між собою), що знімає верхні обмеження за швидкістю представлення подразників, коли зміна швидкості відбувається за рахунок варіації часу експозиції.

Основні труднощі при розробці моделі ФРС полягають у правильному визначенні якості відповідей, тому що при досягненні граничної швидкості представлення сигналів, реакція у відповідь часто виробляється під час подачі наступного сигналу.

На рис. 1 показана діаграма проходження сигналів і відповідей в екстремальних умовах переробки інформації. Відповідь, позначена імпульсом чорного кольору, є реакцією на подразник 1, тому що задовольняє умовам

$$(T_{\text{рв}} - 3G) < T_1 < (T_{\text{рв}} + 3G) \quad (8),$$

$$T_2 < (T_{\text{рв}} - 3G) \quad (9),$$

де G - середньоквадратичне відхилення реакції вибору, T_1 - час від початку представлення 1-го сигналу до появи переднього фронту відповіді, T_2 - час від початку представлення 2-го сигналу до появи переднього фронту відповіді.

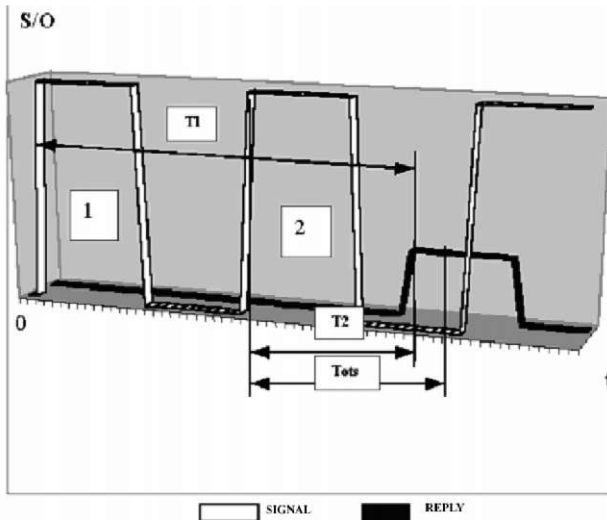


Рис.1. Діаграма проходження сигналів і відповідей в умовах сенсомоторного навантаження.

Часовий інтервал, що задовольняє умові

$$T_{ots} = (T_{ps} - 3G) \quad (10),$$

називається часом відставання. Іншими словами, період часу T , протягом якого виконується аналіз відповіді на попередній подразник 1 під час поточного подразника 2, називається часом відставання. У деяких методиках (ПНН, ПНДІ, ПРОГНОЗ та ін.), що застосовують режим зворотного зв'язку, гранична швидкість представлення подразників (50 % правильних відповідей, 50 % помилок) практично не досягалася через відсутність або недостатнє відпрацювання терміна «час відставання» [8, 9, 10]. Наприклад, правильна рухова відповідь, початок якої

припадав на кінець поточного подразника, у дійсності була відповіддю на попередній подразник, порівнювалася з латентним періодом реакції вибору, а фактично оброблялася як відповідь на поточний, що в більшості випадків сприймалося як неправильна реакція. Це знижувало робочий поріг, на якому повинний був виявлятися НДС, і зменшувало діапазон можливих варіацій індивідуальних розходжень випробовуваних. У нашому випадку, якщо початок відповіді припадає на період часу відставання T_{ots} і закінчується після його завершення, то залишкова рухова реакція не розглядається при аналізі відповіді на поточний подразник. Величина T_{ots} не може перевищувати тривалість поточного сигналу. У розглянутій моделі аналіз відповіді відбувається на передньому фронті нервово-м'язового скорочення (натискання кнопки). Якщо попередній період сигналу був меншим або дорівнював T_{ots} , то поточне значення часу відставання не повинно перевищувати поточного періоду сигналу, у припущенні, що дано правильну відповідь на попередній подразник. У цьому випадку після закінчення періоду відставання виробляється аналіз відповіді на попередній подразник і, залежно від його якості або загорається наступна експозиція (при правильній відповіді) або поточна величина часу гасіння збільшується (при помилковій реакції) на прийнятну величину збільшення ΔV .

Під час моделювання ФРС будується крива працездатності (рис. 2). На осі абсцис відкладається кількість перероблених сигналів, на осі ординат – поточна швидкість переробки інформації.

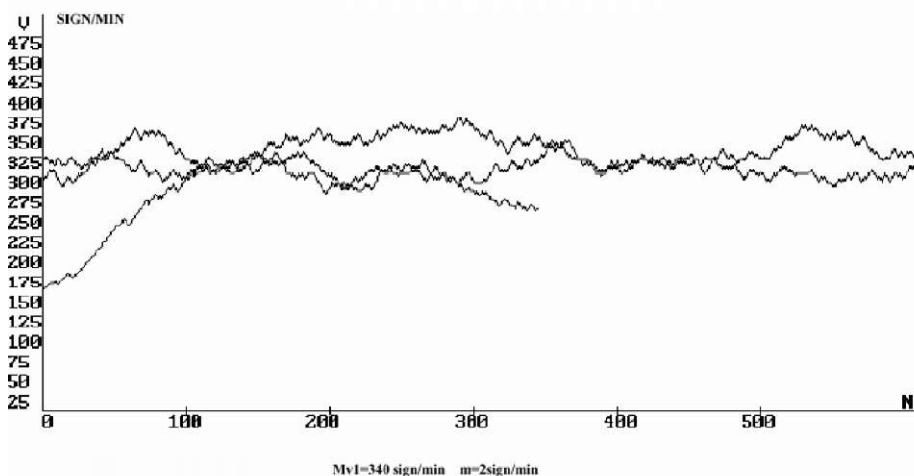


Рис. 2. Первинна крива швидкості обробки інформації при моделюванні НДС.

Детальний аналіз якості помилкових реакцій при моделюванні зосередженого робочого стану встановив, що на граничних швидкостях, коли впливають підряд два позитивних подразники, адресовані

до однієї руки, як правило, спостерігається явище сумування, коли реакція на другий подразник розвивається на тлі залишкового збудження і сумується з ним. Якщо час нервово-м'язового скорочення стає

більшим періоду проходження поточного позитивного сигналу, то фіксується одна відповідна реакція на два підряд запропонованих подразники, адресованих до однієї руки. У той же час, коли другий позитивний подразник адресується до протилежної руки, сумування нервово-м'язового скорочення не спостерігається і підвищується ймовірність безпомилкової відповіді на другий позитивний сигнал, тобто має місце неоднорідність тестованого матеріалу.

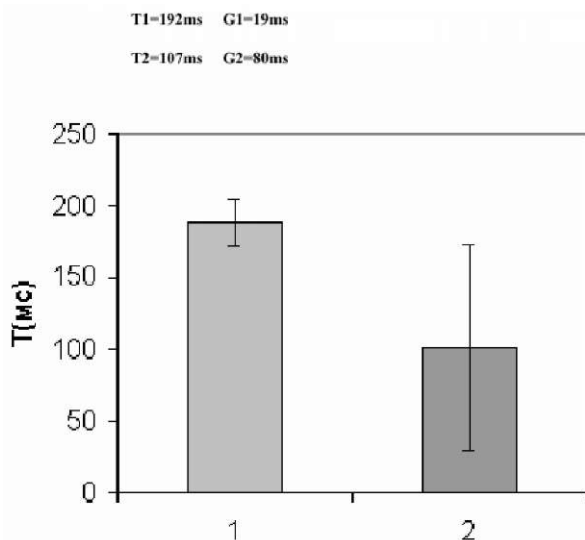


Рис. 3. Індивідуальні тимчасові характеристики нервово-м'язових скорочень (1) і переключень (2).

Для додавання внутрішньої узгодженості даних методиці й однорідності тестованому матеріалу, вводиться новий тип тригерної реакції. На відміну від реакції вибору двох сигналів із трьох, коли відповідь на два типи позитивних подразників адресувалася відповідно до лівої або правої руки, у тригерній реакції відповідь тільки на один тип позитивного подразника адресується по черзі до кожної руки. З рисунка 3 видно, що швидкість нервово-м'язового переключення (тригер-тепінг тест) вище майже в 2 рази, ніж швидкість повторного нервово-м'язового скорочення (звичайний тепінг тест), що дає підставу до застосування тригерної реакції вибору при моделюванні ФРС. Введення тригерного типу реакції сприяє вирішенню проблеми ідентифікації якості відповіді на гальмівний подразник при відсутності рухової реакції на нього [8]. Чим вважати відсутність рухової реакції на гальмівний подразник при роботі на екстремальних швидкостях переробки інформації: правильною відповіддю або результатом прояву поза межного гальмування? При ідентифікації відповіді на позитивний подразник такої подвійності не існує, тому для вирішення даної проблеми пропонується

наступний підхід. При моделюванні НДС відсутність рухової реакції на гальмівний подразник ідентифікувати як правильну реакцію, якщо в попередніх серіях відповідей для даної швидкості переважали безпомилкові відповіді на позитивний подразник.

З метою зменшення орієнтовної реакції для моделювання ФРС, дослідження проводяться поетапно «від простого до складного»:

1. Тригер-тепінг тест (ТТТ). Випробуваному пропонується інструкція «На протязі 30 секунд по черзі натискайте кнопки у швидкому темпі!». Під час тесту будуються тимчасові криві нервово-м'язових скорочень для кожної руки окремо. Після закінчення тесту виконується статистична обробка і запис у файл «ttrp.dat» звітів часу натискання і відпускання кожної кнопки. ТТТ дозволяє визначати максимальне число імпульсів, які досліджувана функціональна структура може передати в одиницю часу

$$F_i = N_m / 30 \quad (11),$$

вимірюється в Гц і є показником лабільності нервово-м'язового апарату (додаткова властивість нервової системи, що характеризує швидкість виникнення і припинення нервових процесів) [6]. Час тестування 30 с. обрано виходячи з того розуміння, що основне навантаження при виконанні методики в перші 30 секунд лягає на центральну нервову систему, а наступна робота виявляє фізичне м'язове стомлення [4].

2. Проста зорово-моторна тригерна реакція (ПЗМТР). Випробуваному пропонується інструкція: «Якнайшвидше натискайте по черзі ліву і праву кнопки з появою сигналу вертикаль!». Якщо латентний період ПЗМТР фіксується менше ніж 100 мс, то загорається транспарант «Передчасна реакція!», при повторному натисканні однієї і тієї ж кнопки загорається транспарант «Порушено чергування рук!». Після закінчення тесту проводиться статистична обробка і запис латентних періодів ПЗМТР та якості відповідей у файл «trpzmr.dat».

3. Тригерна реакція вибору (ТРВ). Випробуваному пропонується інструкція: «Якнайшвидше натискайте по черзі ліву і праву кнопки з появою вертикалі, на горизонталь - кнопки не натискати!». Попередження про помилку передчасної реакції порушенні чергуванні рук аналогічно ПЗМТР, але можуть з'являтися наступні попереджуючі повідомлення при гальмівній реакції «Не натиснули чергову кнопку!» і при руховій реакції на гальмівний подразник «на горизонталь - кнопки не натискати!». Також виконується статистична обробка і запис латентних періодів ТРВ і якості відповідей у файл trv.dat. Експериментатор у голос повинний попереджати про порушення моторних реакцій при проведенні ПЗМТР і ТРВ.

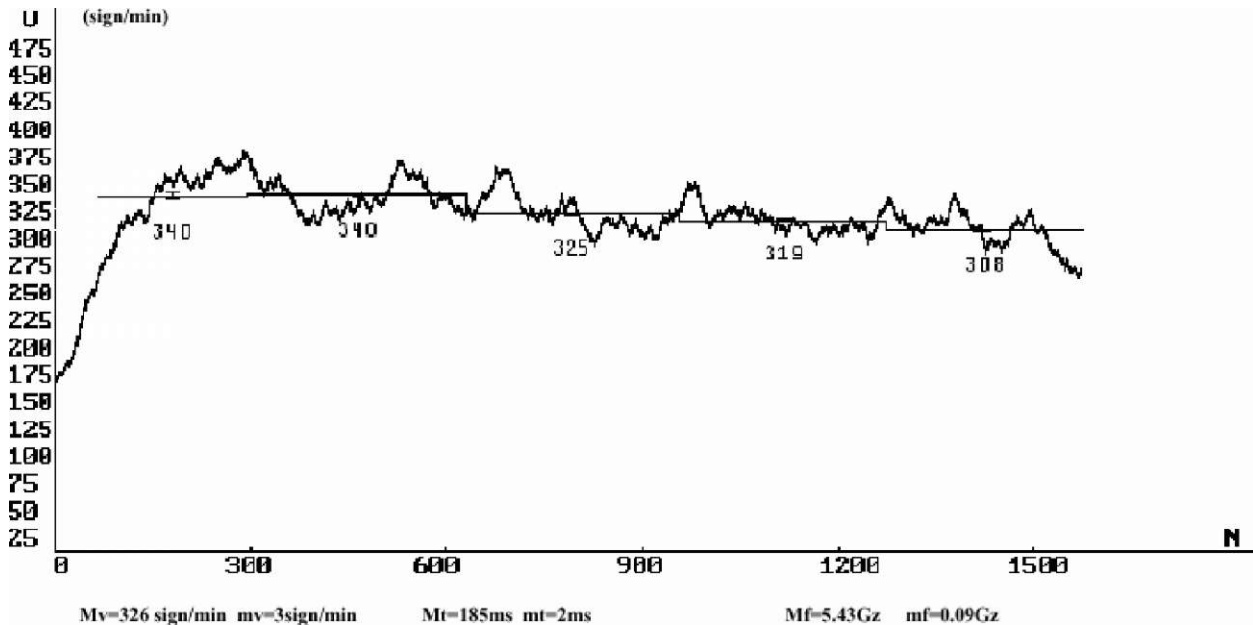


Рис. 4. Крива швидкості обробки інформації при моделюванні НДС.

4. Моделювання ФРС. Результуючий графік на прикладі моделювання НДС представлений на рис. 4, де виконано стискання у часі по осі абсцис і на якому чітко спостерігається повільнохвильова складова нейродинамічних коливань (НДК). Для мозку має велике значення ритмічний слід, що забезпечує збереження потенційної домінантності [11]. Це знаходить відображення у феномені «мічених атомів» ЕЕГ при циклічній психомоторній роботі [12], коли з'являються потенціали з частотою, що відповідає її темпу. Враховуючи спряженість ритмічних коливань серцевого ритму й електричної активності мозку [13], а також нереальність неузгодженості перебігу їх із НДК, становить інтерес вироблення методу переходу від одного ритмічного процесу до іншого і визначення ступеня гармонійності поєднання цих ритмічних процесів. При спектральному аналізі НДК окремо розглядається область нестационарних сигналів, що відображають різні перехідні стани ВНД і дозволяють оцінювати динамічність і силу НП як загальний випадок і стійкість до дії внутрішнього або зовнішнього збурювання (гіпоксичний вплив) як окремий випадок; а також стаціонарні тимчасові сегменти, що дозволяють оцінити рухливість і урівноваженість НП. Класичні методи спектрального аналізу для нашого випадку втрачають свою інформативність, тому пропонується застосовувати спектральний аналіз на площині комплексних частот [14]. При цьому відбувається апроксимація послідовності із відрахунків

процесу $x(1), \dots, x(N)$ лінійної комбінації загасаючих, зростаючих або незмінних за амплітудою косинусоїд:

$$X[n] = \sum_{k=1}^{L/2} 2A_k \exp\left[-\frac{n}{T_k}\right] \cos\left[2\pi f_k(n-1)T_k + \phi_k\right] \quad (12)$$

де $1 < n < N/L$ - порядок апроксимуючої косинусоїдальної моделі, T - інтервал звітів у секундах, A_k і a_k - амплітуда і коефіцієнт загасання (у с^{-1}) k -ї косинусоїди, f_k і q_k - частота (у герцах) і початкова фаза (у радіанах) k -ї косинусоїди. Параметрами для побудови спектра на площині комплексних частот аналізованого процесу є: f_k , a_k , P_k - потужність k -ї, що змінюється за амплітудою косинусоїди. Як базову процедуру для розрахунку спектральної потужності використовують процедуру Проні [15].

Програма ідентифікує перехідний (виражений нестационарний) процес і сталий (виражений стаціонарний) процес за результатами проведення параметричного спектрального аналізу і визначає середнє значення швидкісної інтегральної характеристики переробки інформації у вигляді

$$V_{cp} = \bar{V} \pm m \quad (13)$$

як за час усього сталого режиму роботи випробуваного, так і за кожну хвилину. Параметр $\bar{V}$ оцінює рухливість НП і розраховується як середня величина швидкості представлення сигналів для стаціонарного ряду максимальної тривалості:

$$\bar{V} = \frac{L_{\max}}{k \cdot L_{\min}} V(k) / (L_{\max} - L_{\min}) \quad (14),$$

де $L_{\max}$ і $L_{\min}$ - максимальний і мінімальний номер серій представлених сигналів стаціонарного ряду.

Швидкість і успішність первинного пристосування індивіда до нових умов функціонування як показник динамічності НП пропонується оцінювати за величиною коефіцієнта зростання

$$K_B = T_s / T_{SCP}^+ \quad (15),$$

де T_s - період аналізу сигналу (у даному випадку визначається часом моделювання і дорівнює 300 с);

$$T_{SCP}^+ = \frac{p_i}{\Delta_i \cdot 0} / \frac{\Delta_i}{\Delta_i \cdot 0} p_i \quad (16)$$

час збільшення в e раз (e - число Ейлера) у середньому амплітуди сигналу, складеного зі зростаючих за амплітудою косинусоїд вихідного сигналу.

Швидкість зниження темпу обробки інформації до кінця тесту характеризує силу нервових процесів [15, 6]. Чим швидше настають явища втоми в нервових центрах, тим раніше відбувається достовірний спад кривої працездатності. Оскільки відомо, що в осіб зі слабкою НС фоновий рівень активації вищий, сумування порушення при частому багаторазовому повторенні подразників приводить до швидкого досягнення межі реагування, за якою настає розвиток гальмування. В осіб із сильною НС вихідний рівень активації нижчий, у зв'язку з чим сумування порушення в них може відбуватися довше. Виходячи з вищевикладеного, силу НП пропонується оцінювати за величиною коефіцієнта загасання

$$K_3 = T_s / T_{SCP}^- \quad (17),$$

де

$$T_{SCP}^- = \frac{p_i}{\Delta_i \cdot 0} / \frac{\Delta_i}{\Delta_i \cdot 0} p_i \quad (18)$$

час зменшення в e раз, у середньому, амплітуди сигналу, складеного зі загасаючих за амплітудою косинусоїд вихідного сигналу.

Урівноваженість НП, за аналогією з показником середнього відхилення реакції на об'єкт, що рухається, пропонується оцінювати як сумарну потужність періодичних

$$P_n = \frac{p_i}{\Delta_k \cdot 0} \quad (19)$$

стаціонарних складових НДВ

зіставлення даного показника з коефіцієнтом врівноваженості, що визначається при зосередженому ФРС як величина розподілу кількості рухових реакцій на гальмівний подразник до величини пропущених позитивних подразників, а також відношенням середніх значень латентних періодів, що визначаються на тлі залишкового порушення і гальмування залежно від типу попереднього подразника.

Висновки. Моделювання сенсомоторного гомеостазу і якісна реєстрація психомоторної періодики стали можливими у результаті: 1) застосування нелінійної зміни швидкості переробки інформації з урахуванням індивідуальних особливостей обстежуваного; 2) детального відпрацювання парадигми «час відставання»; 3) введення тригерного типу реакції 4) рішення феномену граничної гальмівної реакції. Спектральний аналіз сенсомоторних коливань на площині комплексних частот дозволяє кількісно оцінити основні властивості нервових процесів і оцінювати вплив високогірної гіпоксії на ВНД людини.