

Зміна параметрів функціонування системи дихання в процесі адаптації спортсменів до гірських метеофакторів

УДК 519.8.812.007

Н. І. Аралова, П. В. Білошицький

¹Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України, Київ, Україна

²Українська академія наук, Київ, Україна

Резюме. Цель. Решение проблемы надежности функционирования организма в экстремальных условиях. Предложен новый подход для определения особенностей функционирования организма в условиях гипобарической гипоксии, который основывается на применении методов математического моделирования.

Методы. На основе методов математического моделирования и теории надежности построена математическая модель надежности функциональной системы дыхания, осуществлена ее программная реализация, проведена индивидуализация модели и численный анализ модели в динамике дыхательного цикла.

Результаты. Показано, что слабым звеном в организме человека, ограничивающим его работоспособность, является система дыхания и обосновано целесообразность оценки работоспособности человека на основе анализа работы системы дыхания. Результаты имитационного моделирования процессов адаптации к условиям горных метеофакторов свидетельствуют о том, что в экстремальных условиях уровни функционирования системы дыхания формируются на основе принципа разрешения конфликтной ситуации между управляющими и исполнительными органами саморегуляции в их борьбе за кислород.

Выводы. Установлено, что спортсменам в условиях сочетанного воздействия гипобарической и гиперметаболической гипоксии при работе в условиях повышенной ситуационной напряженности необходимо уделить особое внимание на обеспечение психофизиологической работоспособности.

Ключевые слова: надежность работы организма, гипоксия, нагрузка, адаптация, математическая модель системы дыхания.

Abstracts. Aim. Solving the problem of body reliability under extreme conditions. A new approach for the definition of the functioning of the body under hypobaric hypoxia, based on the use of mathematical modeling, was proposed.

Methods. On the basis of mathematical modeling and reliability theory, a mathematical model of reliability of SCF was built, a software implementation and individualisation were made and a quantitative analysis model of the dynamics of the respiratory cycle was provided.

Result. It is shown that the weak link in the body, which limits its performance, is the respiratory system. Expediency of assessing work capacity on the basis of analysis of the respiratory system, was proved. The results of simulation modeling of processes of adaptation to mountain meteorological factors indicate that in extreme conditions the level of functioning of the respiratory system is formed on the basis of the solution of conflicts between governing bodies and executive bodies of self-regulation in their struggle for oxygen.

Conclusion. It was established that the athletes under the conditions of combined action of hypobaric and hypermetabolic hypoxia while working in high tension situation, should pay special attention at providing psycho-physical work capacity.

Key words: the reliability of the body, hypoxia, stress, adaptation, mathematical model of the respiratory system.

Постановка проблеми. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробка методів підготовки та оцінки процесу тренування спортсменів з урахуванням їхньої адаптації до екстремальних умов зовнішнього середовища — дуже важлива сучасна проблематика дослідження спеціалістів, які працюють у сфері спорту вищих досягнень [14]. Під час навантаження великої потужності в умовах гіпоксичної гіпоксії людина витрачає значну кількість енергії, що призводить до розвитку гіпоксичних станів у робочих м'язах та інших тканинах організму, що може значно обмежити його працездатність. Одним із підходів до оцінювання ступеня розвитку гіпоксії в окремих групах тканин та в цілому організмі є використання математичної моделі функціональної системи дихання [10, 13, 16].

Успішне виконання людиною роботи в умовах гіпоксичної гіпоксії багато в чому залежить від функціонального стану, підготовленості, особливостей фізіологічного та психофізіологічного статусів. Тільки в процесі обстеження кожного окремого індивідууму можна розпізнати особливості функціонування його організму в цілому та його окремих функціональних систем. Причому організм людини повинен мати раціональне забезпечення адекватної життєдіяльності, оскільки його характеристики, як зовнішні, так і внутрішні постійно змінюються.

Кожний організм — це складна динамічна система, тому при оцінці його функціональних можливостей слід враховувати загальні закономірності надійності функціонування складних систем [5, 11]; такі системи належать до послідовно-паралельних — з можливою компенсацією недостатності функціонування однієї ланки напруженою роботою інших. Найпростішою моделлю для живої системи є послідовна система зі слабкою ланкою [11]. Слабкими ланками є ті системи, недостатній рівень, функціонування яких призводить до відмови від роботи всього організму. Оскільки часто неефективність функціонування систем дихання та кровообігу спричиняє відмову від виконання необхідної роботи, то ці системи відносимо до слабких ланок і в подальшому будемо розглядати саме їх.

Зупинимось детальніше на математичній моделі функціональної системи дихання (ФСД) [3, 10], завдяки якій можна отримати широку інформацію про роботи її окремих ланок — про адекватну доставку кисню до тканин та виведенні вуглекислого газу.

Ця модель описує транспорт та масообмін респіраторних газів на всьому шляху кисню в організмі — в дихальних шляхах, альвеолярному

просторі легенів, легеневих та тканинних капілярах, артеріальній та змішаній венозній крові, тканинних резервуарах, органах (мозок, серце, дихальні та скелетні м'язи, інші тканини та органи, а також компенсуючі механізми саморегуляції (величина вентиляції легенів, хвилинний об'єм системного та локальних (органичних) кровотоків), які стабілізують функціональний стан організму на заданому рівні його функціональної активності.

Модель функціонування системи дихання (ФСД) — це керована динамічна система, стан якої в кожний момент часу визначається напруженнями кисню та вуглекислого газу в кожній структурній ланці системи дихання (альвеолах, крові та тканинах). Керування станом при постійному чи заданому на окремому часовому відрізку збуренні (висока функціональна активність окремих груп тканин) здійснюється виконавчими органами саморегуляції — дихальними м'язами (які формують необхідний рівень вентиляції для компенсації гіпоксичних станів, що виникають у серцевому м'язі), а також гладенькими м'язами судин, вазодилатація та вазоконстрикція яких сприяють розподіленню системного кровотоку в органах та тканинах.

Крім цих активних механізмів, у моделі присутні також пасивні механізми саморегуляції (концентрація гемоглобіну в крові, міоглобіну в скелетних та серцевому м'язах та їхні спроможності до оксигенації, концентрація буферних основ крові, тощо). Припускається, що рішення про вибір величин компенсуючих впливів приймається центром прийняття рішень на основі інформації про рівень функціональної активності, ступеня кисневої недостатності, надлишку накопичення вуглекислого газу у всіх тканинних регіонах та передається на виконавчі органи саморегуляції, підвищуючи їхню функціональну активність та забезпечуючи виконання основної функції системи дихання.

Необхідною передумовою високої надійності організму є адаптація до гіпоксії та механізми її забезпечення [6, 9, 11]. Для математичного аналізу адаптаційних можливостей організму до гіпоксії різноманітної етіології використовується математична модель ФСД [3, 10], за допомогою якої описуємо транспорт та масообмін респіраторних газів у дихальних шляхах, альвеолярному просторі, крові та тканинах за допомогою звичайних нелінійних диференціальних рівнянь. Регуляція здійснюється на основі компромісного вирішення конфліктної ситуації, яка виникає між тканинами та органами у боротьбі за кисень в умовах його дефіциту [15].

Мета дослідження — побудувати математичну модель надійності функціональної системи дихання та здійснити її програмну реалізацію,

індивідуалізацію, чисельний аналіз в динаміці дихального циклу.

Методи дослідження: методи математично-моделювання та теорії надійності.

Результати дослідження та їх обговорення. Аналіз математичної моделі ФСД показав, що короточасні збурення системи, які призводять до виникнення гіпоксії, можуть бути компенсовані за участю механізмів саморегуляції, які склалися в процесі еволюції – інтенсифікацією роботи системи зовнішнього дихання, серцевого м'яза, гладеньких м'язів судин.

При більш тривалому періоду адаптації до гіпоксії формуються функціональні механізми, які змінюють чуттєвість організму до гіпоксії, підвищують ефективність тканинного обміну, стимулюють еритропоез. А при довготривалій адаптації організму до гіпоксії відбуваються структурні зміни, наприклад, гіпертрофія виконавчих органів саморегуляції, насамперед, лівого шлуночка.

Математична модель ФСД дає досліднику можливість аналізувати кисневі та вуглекислотні режими організму в динаміці дихального циклу при різних рівнях функціонального навантаження та при різноманітних умовах навколишнього середовища; сформувати такі режими системи зовнішнього дихання, які б сприяли збільшенню запасів кисню в організмі і тим самим підвищити ресурс серцевого м'яза при регуляції гіпоксичних станів, які виникають при сумісному впливі гіпоксичної та гіперметаболічної гіпоксії, прогнозувати стан організму при різноманітних фізичних зусиллях, оцінити ефективність процесу підготовки спортсмена, розподілити важкі навантаження з урахуванням функціональних можливостей окремого індивідууму та залежно від ситуації, яка складається в процесі тренування та змагання.

Процес дихання, при якому відбувається транспорт та масообмін кисню, розглядається як керована динамічна система, яка описується диференціальними рівняннями та алгебраїчними співвідношеннями. Керованими параметрами є вентиляція V , системний Q та органні Q_i кровотоки.

Зазвичай, збурення, які діють на систему, розподіляються на зовнішні та внутрішні: до зовнішніх належать зміни складу повітря, яке вдихається, барометричний тиск, до внутрішніх – зміни інтенсивності обмінних процесів в органах та тканинах, які кількісно характеризуються швидкістю споживання кисню $q_i O_2$ та виділення вуглекислого газу. Роль короткотермінової адаптації полягає у виведенні збуреної динамічної системи транспорту та масообміну респіраторних газів в деякий стійкий для сформованих умов життєдіяльності стаціонарний стан.

Представимо задачу короточасної адаптації як задачу оптимальної саморегуляції [15]. Припустимо, що оптимальним є набір параметрів V , Q та Q_i , які забезпечують на траєкторіях руху збуреної динамічної системи мінімум функціоналу:

$$J = \int_{t_0}^T \left[\rho_1 \sum_i \lambda_i (G_i O_2 - q_i O_2)^2 + \rho_2 \sum_i \lambda_i (G_i CO_2 + q_i CO_2)^2 \right] dt, \quad (1)$$

де $G_i O_2$, $G_i CO_2$ – відповідно потоки кисню та вуглекислого газу через капілярно-тканинний бар'єр; $q_i O_2$, $q_i CO_2$ – швидкість споживання кисню та утворення вуглецю в i -тому тканинному регіоні; λ_i – коефіцієнти, що характеризують кровонаповнення тканин; ρ_1 та ρ_2 – коефіцієнти, що відображають чутливість організму до нестачі кисню та надлишку вуглекислого газу.

Саморегуляція системи дихання здійснюється не лише при короточасній, але й при більш тривалому періоду адаптації та при довготривалій адаптації, коли збурення діють упродовж або періодично повторюються. Це призводить до розвитку додаткових адаптаційних механізмів, які дозволяють у відповідь на збурення здійснити більш ефективну організацію обмінних процесів у тканинах.

Стан динамічної системи, яку представлено в моделі, визначається рівнем напружень кисню ρO_2 та вуглекислого газу ρCO_2 .

Передбачено індивідуалізацію моделі з урахуванням маси, довжини тіла, структури м'язів. У модель введено коефіцієнти чутливості організму до гіпоксії та гіперкапнії. Для кожного індивідууму вони свої та залежать від ступеня адаптації організму до фізичних навантажень та стану його психофізіологічного статусу. Досвід використання моделі показав, що зменшення цих коефіцієнтів у тренувальному процесі свідчить про ефективність процесу. Проте ці коефіцієнти не можуть бути більшими за деякі порогові значення, які призводять до розрегульованості (некерованості) процесу і, як наслідок, до розвитку патологічних процесів. У стані спокою та під час навантаження визначаються величини вентиляції легенів, хвилинного об'єму крові, гемоглобіну крові, загального споживання кисню організмом та виділення вуглекислоти. Вибір коефіцієнтів чутливості здійснюється таким чином, щоб величини вентиляції та кровообігу, отримані в результаті імітації, співпадали з даними, отриманими при обстеженні.

Для розрахунків використовувались дані, отримані співробітниками Ельбруської медико-біологічної станції при обстеженні групи рятівників із Нальчика, тренуваних до роботи в умовах високогір'я. З метою виявлення резервів надійності організму обстеження проводили на другу добу їхнього перебування в Приельбруссі в с. Терскол на висоті 2100 м та на 10-ту добу безпосередньо після їх сходження на Ельбрус (5621 м). Кожне обстеження складалося з двох етапів: у природних умовах на висоті 2100 м та у барокамері на висоті 5 600 м над рівнем моря.

Визначали хвилинний об'єм дихання, газовий склад альвеолярного та видихуваного повітря, параметри гемодинаміки та крові. За їх допомогою розраховувались показники, що характеризують стан системи дихання та крові (швидкість споживання кисню, дихальний об'єм, дихальний коефіцієнт, хвилинний об'єм крові, систолічний об'єм) та показники, що характеризують економічність системи дихання та гемодинаміки (вентиляційний та гемодинамічний еквіваленти, кисневий ефект дихального циклу, кисневий пульс) [1, 2, 4, 17].

У подальшому, використовуючи розраховані параметри та параметри, отримані в результаті обстеження, імітували умови обстеження та розраховували парціальний тиск та напруження респіраторних газів в альвеолах, артеріальній та змішаній венозній крові та тканинах. Для розрахунків використовували чотирикамерну модель системи дихання — мозок, серце, скелетні м'язи та інші тканини.

Виконавчими органами саморегуляції основної функції системи дихання є дихальні м'язи, серцевий м'яз та гладенькі м'язи судин. Проте людина може свідомо керувати роботою тільки дихальних м'язів, задавати більш інтенсивний ритм зовнішнього дихання і, тим самим, формувати необхідний рівень вентиляції. У цьому випадку центр регуляції системи дихання перерозподіляє свій ресурс на всі виконавчі органи і тим самим знімає частину навантаження з серцевого м'яза, збільшуючи його регуляторний ресурс.

Отже, для збільшення кисневого запасу тканин та регуляторного ресурсу серця можна формувати відповідні режими системи зовнішнього дихання, визначаючи оптимальний дихальний об'єм, протяжність фаз вдиху та видиху для кожного можливого рівня функціональної активності. Особливо це важливо робити при виконанні роботи при сумісному впливі гіпоксикаричної та гіперметаболічної гіпоксії.

Розрахунки показали, що навіть у початковий період адаптації напруження кисню в артеріальній крові у тренуваних осіб було досить високим

і складало $79,70 \pm 3,00$ мм рт.ст., отже, рівень вторинної тканинної гіпоксії не був глибоким: в тканинах мозку — $30,91 \pm 2,00$ мм рт. ст., в серці $25,15 \pm 2,00$ мм рт. ст., в скелетних м'язах — $25,65 \pm 2,30$ мм рт. ст., в тканинах інших органів — в середньому $39,25 \pm 2,80$ мм рт. ст., що обумовило незначний рівень венозної гіпоксемії — $34,50 \pm 2,31$ мм рт. ст.

Обстеження на висоті 5600 м над рівнем моря на другу добу адаптації виявило, що завдяки своєчасному підключенню регуляторних механізмів не сталося поглиблення гіпоксії на рівні тканин: ρO_2 в тканинах мозку складало $30,28 \pm 2,28$ мм рт. ст., в серці — $26,88 \pm 3,31$ мм рт. ст., в скелетних м'язах — $27,8 \pm 1,94$ мм рт. ст., в тканинах інших органів — в середньому $38,06 \pm 4,27$ мм рт. ст., в змішаній венозній крові — $34,04 \pm 3,85$ мм рт. ст.

Друге обстеження осіб було проведено на десяту добу адаптації (на другу добу після здійснення тренувального сходження на Ельбрус), тобто на обстежених сумісно впливали гіпоксикарична та гіперметаболічна гіпоксія. Обстеження показало, що відбулося деяке зниження рівня артеріальної гіпоксемії з $80,04 \pm 3,00$ до $84,18 \pm 2,54$ мм рт. ст. Це, в свою чергу, обумовило підвищення значень напружень кисню в тканинах мозку до $33,3 \pm 0,80$ мм рт. ст., що практично складає рівень ρO_2 для умов нормоксії. В тканинах серця ρO_2 зросло на $2,75 \pm 0,40$ мм рт. ст. і склало $27,90 \pm 1,63$ мм рт. ст., в скелетних м'язах напруження кисню зросло на $1,64 \pm 0,23$ мм рт. ст. і досягло рівня $27,29 \pm 1,46$ мм рт. ст., в тканинах інших органів — відбулося збільшення ρO_2 з $39,23 \pm 2,8$ мм рт. ст. до $41,5 \pm 3,06$ мм рт. ст. Відповідно зросло напруження кисню в змішаній венозній крові з $34,50 \pm 2,31$ мм рт. ст. до $36,46 \pm 1,97$ мм рт. ст.

Друге обстеження на висоті 5600 м виявило, що завдяки процесам адаптації дещо знизився рівень артеріальної гіпоксемії: ρO_2 в артеріальній крові зросло на $3,28 \pm 2,60$ мм рт. ст. до рівня $57,88 \pm 3,42$ мм рт. ст. Зростання напруження кисню в тканинах головного мозку було недостовірним (на $0,63 \pm 0,04$ мм рт. ст.), в серцевому м'язі відбулося деяке зниження ρO_2 (на $1,38 \pm 0,24$ мм рт. ст.), в скелетних м'язах ρO_2 практично не змінилось (збільшення на $0,18 \pm 0,03$ мм рт. ст.), в тканинах інших органів напруження кисню зросло на $1,66 \pm 0,32$ мм рт. ст. Також відбулося підвищення напруження кисню в змішаній венозній крові на $1,24 \pm 0,36$ мм рт. ст.

У цій статті нами подано лише деякий зріз функціонального стану осіб, які підпали під суїмісну дію гіпоксикаричної та гіперметаболічної

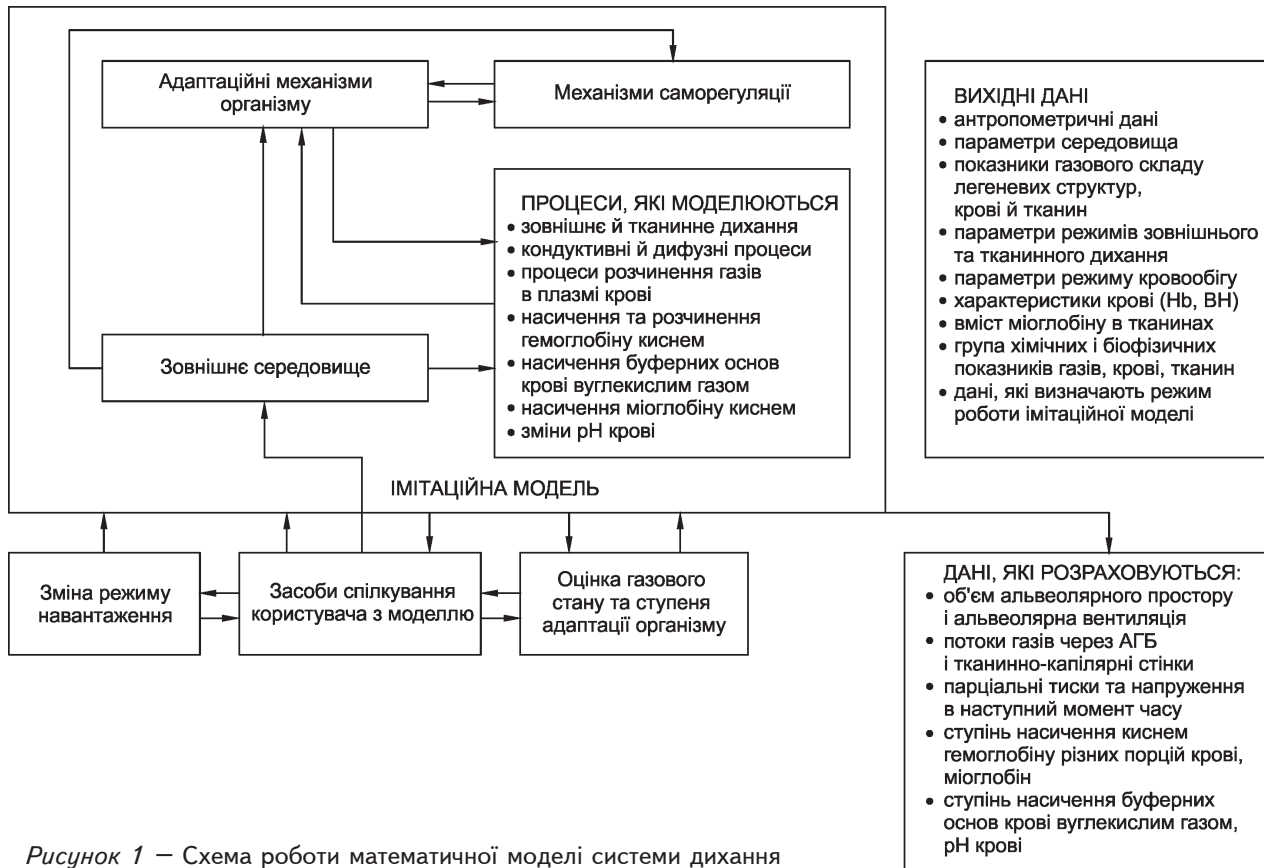


Рисунок 1 – Схема роботи математичної моделі системи дихання

гіпоксії, оскільки метою було виявлення (з подальшим коригуванням) слабких ланок організму та ефективності підготовчого тренувального процесу (з індивідуальною оцінкою та наданням індивідуальних рекомендацій) перед змаганнями, або іншими відповідальними завданнями [5, 9].

Висновки. Результати даного обстеження та подальших розрахунків на математичній моделі показали, що практично всі обстежувані при гіпоксичній гіпоксії мають резерви фізичної потужності і вони можуть виконати значне фізичне навантаження, тобто напруження кисню в скелетних та серцевому м'язах були далекими від критичних рівнів. Значно нижчий запас міцності виявився у тканинах мозку, що може призвести зокрема до порушення координації та утруднити прийняття адекватних рішень. Отже, особам, які підпали під сумісну дію гіпоксичної та

гіперметаболічної гіпоксії та працюють в умовах підвищеної ситуаційної напруги, слід звернути особливу увагу на способи забезпечення психофізіологічної працездатності [7] та швидкого відновлення після фізичного стомлення.

Перспективи подальших досліджень. Під час дослідження нами було поставлено ряд завдань, які необхідно вирішити для оцінювання функціонального стану спортсменів та інших контингентів в процесі їхньої короткотермінової адаптації або тренування. Для того щоб оцінити стан функціональних систем організму, необхідно провести дослідження системи дихання під час навантаження в звичайних умовах підвищеного ситуаційного напруження. Розрахунки на моделі слід проводити при імітації різноманітних зовнішніх збурень. При цьому дослідження психофізіологічних функцій доцільно проводити до та після стандартного навантаження.

Література

1. Аралова А. А. Автоматизированная информационная система функциональной диагностики альпинистов / А. А. Аралова, Н. И. Аралова, П. В. Белошицкий, Ю. Н. Онопчук // Спорт. медицина. – К., 2008. – № 1. – С. 83–94.
2. Аралова А. А. Автоматизированная информационная система функциональной диагностики спортсменов / А. А. Аралова, Н. И. Аралова, Л. А. Ковальчук-Химюк,

References

1. Aralova A. A. Automatic information system for functional diagnostics of alpinists / A. A. Aralova, N. I. Aralova, P. V. Beloshitsky, Y. N. Onopchuk // Sport. medycyna / Kyiv, 2008. – N 1. – P. 83–94.
2. Aralova A. A. The automated information system of functional diagnostics of athletes / A. A. Aralova, N. I. Aralova, Y. N. Onopchuk // Controlling

- Ю. Н. Онопчук // Управляющие системы и машины. — 2008. — № 3. — С. 73–78.
3. Аралова Н. И. Математическая модель механизмов краткосрочной и среднесрочной адаптации функциональной системы дыхания лиц, работающих в экстремальных условиях / Н. И. Аралова // Кибернетика и вычислительная техника. — 2015. — Вып. 182. — С. 16–21.
4. Аралова Н. И. Модели данных и алгоритмы их обработки при построении интегральных оценок надежности и работоспособности спортсменов / Н. И. Аралова, В. И. Вишенский, Ю. Н. Онопчук // Компьютерная математика. — 2013. — № 1.
5. Білошицький П. В. Математичні методи дослідження проблеми надійності функціонування організму за екстремальних умов високогір'я / П. В. Білошицький, Ю. М. Онопчук, Д. І. Марченко, Н. І. Аралова // Фізіол. журн. — К., 2003. — 49, № 3. — С. 139–143.
6. Белошицкий П. В. Изучение проблем спортивной медицины на Эльбрусской медико-биологической станции / П. В. Белошицкий // Спорт. медицина. — К., 2008. — № 1. — С. 83–94.
7. Білошицький П. В. Результати вивчення проблем вищої нервової діяльності українськими вченими в Приельбруссі / П. В. Білошицький, О. М. Ключко, Ю. М. Онопчук, А. З. Колчинська // Вісн. Нац. авіац. ун-ту. — К., 2009. — № 2. — С. 105–112.
8. Білошицький П. В. Математичне прогнозування стану борця в поєдинку / П. В. Білошицький, Ю. М. Онопчук, Н. І. Аралова, Б. А. Подліваєв // Спорт. медицина. — К., 2009. — № 1–2. — С. 55–59.
9. Белошицкий П. В. Летопись медико-биологических исследований в Приэльбрусье (1929 – 2006 гг.) / П. В. Белошицкий. — К.: Укр. акад. наук, 2014. — 550 с.
10. Онопчук Ю. Н. Гомеостаз функциональной системы дыхания как результат внутрисистемного и системно-средового информационного взаимодействия / Ю. Н. Онопчук и соавт. // Биоэкология. Единное информационное пространство. — К., 2001. — С. 59–81.
11. Онопчук Ю. Н. К вопросу о надежности функциональных систем организма / Ю. Н. Онопчук, П. В. Белошицкий, Н. И. Аралова // Кибернетика и вычислительная техника. — 1999. — Вып. 122. — С. 72–89.
12. Онопчук Ю. М. Математичні методи дослідження гіпоксичних станів при ішемічній хворобі серця / Ю. М. Онопчук, П. В. Білошицький, Н. І. Аралова, Т. А. Сьомчик // Фізіол. журн. — 2004. — № 3. — С. 47–54.
13. Новосельцев В. Н. Теория управления и биосистемы / В. Н. Новосельцев. — М.: Наука, 1978. — 319 с.
14. Платонов В. Н. Система подготовки спортсменов в олимпийском спорте. Общая теория и практические приложения / В. Н. Платонов. — К.: Олимп. лит., 2004. — 808 с.
15. Полинкевич К. Б. Конфликтные ситуации при регулировании основной функции системы дыхания организма и математические модели их разрешения / К. Б. Полинкевич, Ю. Н. Онопчук // Кибернетика. — 1986. — № 3. — С. 100–104.
16. Dickinson C. J. A computer model of human respiration / C. J. Dickinson. — Lancaster: Medical and Technical Publishing, 1977. — 294 p.
17. Онопчук Ю. Н. Mathematic models and integral estimation of organism systems reliability in extreme conditions / Yu. N. Onopchuk, N. I. Aralova, P. V. Beloshitsky, O. M. Klyuchko // Electronics and control systems. — 2015. — N 4. — P. 109–115.
- systems and mashines. — 2008. — N 3. — P. 73–78.
3. Aralova N. I. Mathematical model of the mechanisms of the short and medium adaptation function of the respiratory system of people working in extreme conditions / N. I. Aralova // Cybernetics and Computer Science. — 2015. — Vol. 182. — P. 16–21.
4. Aralova N. I. Data models and algorithms of their processing in the construction of interval estimates of reliability and performance of athletes/ N. I. Aralova, V. I. Vyshensky, Y. N. Onopchuk // Computer Mathematics. — 2013. — N 1.
5. Biloshytskyi P. V. Mathematical research methods of problems of functioning of the body in extreme conditions of the highlands / P. V. Biloshytskyi, Y. N. Onopchuk, D. I. Marchenko, N. I. Aralova // Fiziolohichniy zhurnal. — 2003. — 49, N 3. — P. 139–143.
6. Beloshitsky P. V. The study of the problems of sports medicine at the Elbrus Medical and Biological Station / P. V. Beloshitsky // Sport. Medytyna. — Kyiv, 2008. — N 1. — P. 83–94
7. Biloshytskyi P. V. The study of problems of higher nervous activity by Ukrainian scientists in Elbrus / P. V. Biloshytskyi, O. M. Klyuchko Y. N. Onopchuk, A. Z. Kolchinsky // Visnyk Natsionalnoho Aviatsiinogo Universytetu. — Kyiv, 2009. — N 2. — P. 105–112.
8. Biloshytskyi P. V. Mathematical forecasting of the fighter's state during the fight / P. V. Biloshytskyi, Y. N. Onopchuk, N. I. Aralova, B. A. Podlivayev // Sport. Medytyna. — Kyiv, 2009. — N 1–2. — P. 55–59.
9. Beloshitsky P. V. Annals of Biomedical Research in the Elbrus (1929–2006) / P. V. Beloshitsky. — Kiev: Ukrainian Academy of Sci. — 2014. — 550 p.
10. Onopchuk Y. N. Homeostasis function of the respiratory system as a result of in-system and systemenvironment interaction information / Y. N. Onopchuk et al. // Bioekomedicine. Single Information Space. — Kiev. — 2001. — P. 59–81.
11. Onopchuk Y. N. On the question of reliability of the functioning of the systems of the body / Y. N. Onopchuk, P. V. Beloshitsky, N. I. Aralova // Cybernetics and calc. technique. — Kiev, 1999. — 124 – P. 11.
12. Onopchuk Y. N. Mathematical methods of research of the hypoxic states with the coronary heart disease / Y. N. Onopchuk, P. V. Biloshytskyi, N. I. Aralova, T. A. Somchuk // Fiziolohichniy zhurnal. — Kyiv, 2004. — N 3. — P. 47–54.
13. Novoseltsev V. N. Control theory and biosystems / V. N. Novoseltsev Moscow: Nauka, 1978. — 319 p.
14. Platonov V. N. The system of training athletes for Olympic sports. — Kyiv: Olimpiyskaya Literatura, 2004. — 808 p.
15. Polinkevich K. B. Conflicts in the regulation of the primary functions of the respiratory system of the body and the mathematical model for their solution / K. B. Polinkevich, Y. N. Onopchuk // Cybernetic. — 1986. — N 3. — P. 100–104.
16. Dickinson C. J. A computer model of human respiration / C. J. Dickinson. — Lancaster: Medical and Technical Publishing, 1977. — 294 p.
17. Onopchuk Y. N. Mathematic models and integral estimation of organism systems reliability in extreme conditions / Y. N. Onopchuk, N. I. Aralova, P. V. Beloshitsky, O. M. Klyuchko // Electronics and control systems. — 2015. — N 4. — P. 109–115.