

УДК 796.012.06(23.0): 612.017+616.12+612.22(045)

DOI: 10.31651/2076-5835-2018-1-2025-1-102-112

Михайло Михайлович Філіппов

Міжнародний центр астрономічних та медико-екологічних досліджень НАН України
Національний університет фізичного виховання і спорту України
filmish@ukr.net

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5096-7445>

Володимир Миколайович Ільїн

Міжнародний центр астрономічних та медико-екологічних досліджень НАН України
Національний університет фізичного виховання і спорту України
ilyin_nufvsu@ukr.net

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7140-0659>

Володимир Ілліч Портниченко

Міжнародний центр астрономічних та медико-екологічних досліджень НАН України
dr.v.portnichenko@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1473-2408>

ФУНКЦІОНАЛЬНІ ЧИННИКИ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ УМОВИ ДЛЯ МАСОПЕРЕНОСУ РЕСПІРАТОРНИХ ГАЗІВ В ОРГАНІЗМІ ПРИ ФІЗИЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ В ГОРАХ

Мета. Проаналізувати (на основі літературного огляду і власних спостережень) вплив перебудов в організмі спортсменів в горах на умови забезпечення масопереносу респіраторних газів при м'язовій діяльності різної інтенсивності. **Методи.** Здійснювали аналіз спеціальної науково-методичної літератури з питань впливу нестачі O_2 у вдихуваному повітрі на функціонування системи зовнішнього дихання, серцево-судинну систему, кисневотранспортну функцію крові, тканинне дихання, гомеостатичні характеристики і т.і. **Результати** Розглядаються основні адаптаційні реакції цих систем в горах, які забезпечують надходження O_2 із зовнішнього середовища до легень, з'єднання з гемоглобіном, транспортування його з кров'ю до працюючих органів, віддача гемоглобіном і переміщення в м'язи, умови споживання O_2 , утворення CO_2 і виведення його із організму та інші процеси. Можна стверджувати про те, що регуляція кисневого постачання організму при фізичних навантаженнях в процесі адаптації до гіпоксії відбувається як на системному рівні, так і на рівні тканин: відбувається економізація всієї системи дихання, розширюються механізми регуляції процесу масоперенесення респіраторних газів.

Таким чином, при напруженій м'язовій діяльності в горах, в результаті зниженого PO_2 у вдихуваному повітрі відбуваються зміни функціонування практично усіх фізіологічних систем, які приймають участь в забезпеченні процесу масопереносу респіраторних газів в організмі.

Ключові слова: гори, адаптація, кардіо-респіраторна система, масоперенос O_2 і CO_2 , фізичні навантаження

Постановка проблеми.

Відомо, що при м'язовій діяльності для забезпечення клітин необхідною кількістю O_2 повинні підтримуватися певні рівні парціального тиску O_2 (PO_2) в альвеолярному повітрі, артеріальній крові, тканинах, венозній крові [1, 3, 10, 32 та інші]. Природно, що зниження PO_2 у вдихуваному повітрі, як це відбувається в горах, обов'язково призводить до змін процесу масопереносу респіраторних газів в організмі.

Гіпоксія, розвивається в горах, грає важливу роль в обмеженні досягнення максимального споживання кисню (МСК) і лімітує можливості його транспорту до

працюючих скелетних м'язів [22, 40]. У зв'язку з цим цікавим стає аналіз того, як змінюються умови для процесу масопереносу респіраторних газів?, якою напругою і в якому ступені функції системи дихання (зовнішнього дихання, кровообігу, газотранспортної функції крові, тканинного дихання тощо) забезпечують швидкість потоків респіраторних газів в організмі? що найбільшою мірою обмежує МСК і зв'язаний з ним рівень працездатності?

Відомо, що основними адаптаційними реакціями в організмі, які зумовлені перебуванням в гірських умовах, є: збільшення: легеневої вентиляції (ЛВ); серцевого викиду крові (СВК); вмісту гемоглобіну (Нв); кількості еритроцитів (Ег) і підвищенню в них 2,3-дифосфогліцерата (ДФГ), що сприяє звільненню O₂ з оксигемоглобіну (НвO₂); кількості міоглобіну (Мв), що полегшує споживання O₂ (СпO₂); розміру та кількості мітохондрій і кількості окисних ферментів в тканинах тощо [5, 13, 25, 32, 41].

Реакція спортсменів на первинне перебування на висоті в горах – це гостра реакція, яка триває від декількох годин до декількох днів, а тривала – від двох до п'яти тижнів (табл.1).

Таблиця 1.

**Характер змін реакцій в організмі спортсменів
на перебування і тренування в умовах середньогір'я**

Фізіологічна функція	Перші дні після переміщення в гори	Останні дні перебування в горах
1	2	3
Легенева вентиляція	Підвищена легенева вентиляція	Легенева вентиляція залишається підвищеною
ЧСС	Підвищена ЧСС в спокої і під час виконання вправ; знижені значення максимальної ЧСС	Повернення значення ЧСС спокою до початку підготовки в горах; максимальна ЧСС залишається зниженою
Систолічний об'єм крові	Зменшення систолічного об'єму в спокої і під час виконання інтенсивної вправи	Повернення значення систолічного об'єму к рівню до початку підготовки в горах
Серцевий викид крові	Знижений серцевий викид в спокої і при виконанні інтенсивної вправи	Повернення значення серцевого викиду к рівню до початку підготовки в горах
Лактат крові	Підвищене накопичення лактату після виконання інтенсивних і максимально інтенсивних вправ	Знижена величина лактату після виконання інтенсивних і максимально інтенсивних вправ про зрівнянню з рівнем до початку підготовки в горах
Аеробне енергозабезпечення	Зменшення МСК на 1% на кожні 100 м збільшення висоти перебування	Збільшення кількості аеробних ферментів; повернення МСК майже до рівня до початку підготовки в горах
Анаеробна ємність	Гіпоксія прискорює гліколітичні реакції і глікогеноліз	Підвищені буферні можливості м'язів збільшують анаеробну ємність
Гормональна регуляція	Збільшений рівень катехоламінів; викид еритропоетину, який стимулює виробництво еритроцитів і гемоглобіну	Збільшений рівень кортизолу, який вказує на стресову реакцію і впливає на катаболізм м'язової тканини
Гематологічна реакція	Об'єм плазми і загальний об'єм крові зменшуються зразу після переміщення в гори	Збільшений загальний об'єм крові, кількість еритроцитів і маси гемоглобіну

Продовження таблиці 1.

1	2	3
Скелетні м'язи		Підвищена щільність капілярів; можливе зменшення м'язової маси внаслідок катаболічної дії кортизола
Водний баланс	Тенденція до безводнення внаслідок посиленої дихальної функції і втрати вологи з сечею	Споживання вологи може бути збільшено до чотирьох-п'яти літрів на добу
Імунна система	Підвищений ризик інфекцій верхніх дихальних шляхів	Підвищений рівень гормонів стреса (катехоламінів, кортизола) пригнічує імунну функцію

Помітні зміни в діяльності різних систем організму спортсмена спостерігаються вже починаючи з висоти 1000-1200 м над рівнем моря (м н.р.м.) [6, 44, 49].

Для фізіології рухової активності і спорту, теорії гіпоксичних станів важливим є з'ясування механізмів, що забезпечують процес масопереносу і утилізації O_2 при м'язовій діяльності різної інтенсивності в умовах зниженого PO_2 у вдихуваному повітрі, особливостей задоволення при цьому підвищеного O_2 – запиту організму.

Одним з важливих наслідків гіпоксії є зниження оксигенації нирок, що стимулює синтез еритропоетина (ЕП) – гормона, який регулює виробництво еритроцитів й Нв в кітковому мозку. Цей процес відбувається в перші 5 – 7 днів. Після цього помітно збільшується здатність крові до транспорту O_2 , що сприяє підвищенню аеробних можливостей спортсменів [40, 42].

Встановлено, що з підйомом в гори МСК поступово знижується [2, 3, 23, 51] (рис.1). Так, якщо на рівні моря воно для фізично здорових дорослих чоловіків може досягати 60 - 70 мл/хв на кг маси тіла, то на висоті 2000 м – 53-58, 3000 м – 45 – 50, 5000 м – 40- 43, 6000 м – 35 - 38, 7000 – 27 - 30 і на висоті 8845 м н.р.м. (тобто, як на Євересті) воно падає майже до 10 – 12 мл/хв тобто, лише в 2 рази може перевищувати величин сновного обміну в умовах рівнини (останні дані передбачені на підставі залежності між висотою і зміною МСК, отриманих на менших висотах).

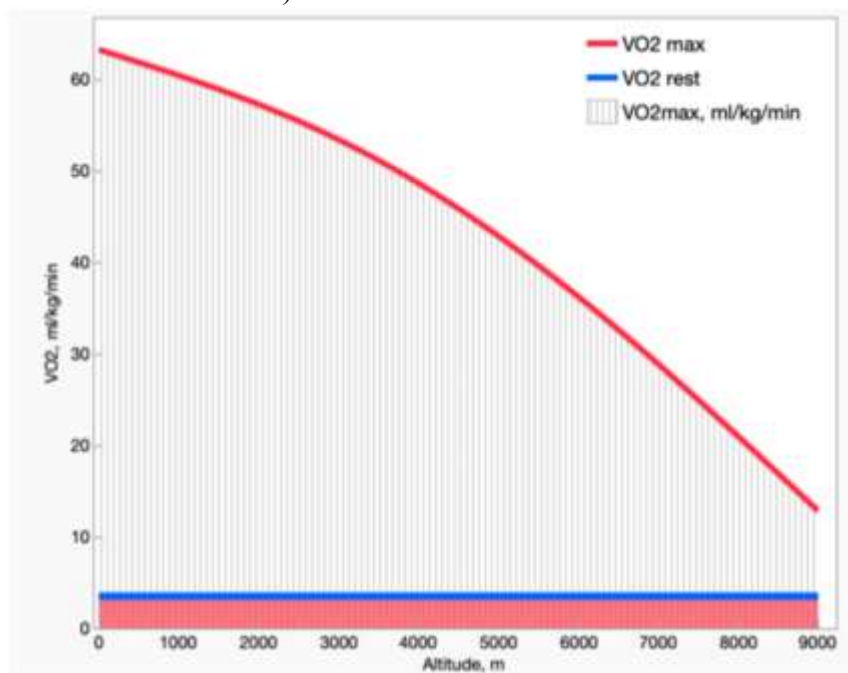


Рис.1.Зміни інтенсивності МСК (мл/кг/хв - червона лінія) на різних висотах в горах. Синя лінія – рівень SpO_2 в стані спокою на рівнині [23].

Певна ефективність гірської підготовки для підвищення функціональних можливостей спортсменів і спортивних результатів як у видах спорту, пов'язаних з проявом витривалості спортсменів, так і в інших, доведена в численних роботах дослідників, що працюють в галузі спортивної фізіології [4, 6, 12, 27, 46, 51].

Незважаючи на те, що кількість фундаментальних досліджень в цій галузі знань на післярадянському просторі значно скоротилася, інтерес до проблеми підготовки спортсменів в гірських умовах залишається досить високим.

Мета роботи. Проаналізувати (на основі літературного огляду і власних спостережень) вплив перебудов в організмі спортсменів в горах на умови забезпечення масопереносу респіраторних газів при м'язовій діяльності різної інтенсивності.

Методи. Здійснювали аналіз спеціальної науково-методичної літератури з питань впливу нестачі O_2 у вдихуваному повітрі на функціонування системи зовнішнього дихання, серцево-судинну систему, кисневотранспортну функцію крові, тканинне дихання, гомеостатичні характеристики і т.і. Аналізували питання, пов'язані з адаптаційними процесами у спортсменів при перебуванні в горах. Використовували неформативні файли пошукових систем: «Google», «Yandex» (www.yandex.ru) – 20 сайтів, «Каталог ресурсів» (www.aha.ru) – 30 сайтів, «Alta Vista» (www.alvista.com) – 40 сайтів.

Результати та їх обговорення. В даний час відомо багато закономірностей реакцій організму в горах на короткочасний і тривалий гіпоксичний вплив. В результаті встановлених факторів і положень, представлених в роботах великої кількості дослідників, в послідовному процесі адаптації до гірських умов виділяють: по-перше, реакції, спрямовані на відновлення порушеного гомеостазу і збереження інтенсивності тканинних процесів, відповідних кисневому O_2 -запиту, який досягається, перш за все, зусиллям функції зовнішнього дихання [7, 9], гемодинаміки [14, 16, 39, 44], зростанням кисневозв'язувальних властивостей крові [15, 17, 19, 25, 31, 34]; по-друге, морфофункціональними та біохімічними перетвореннями, які формують пристосувальні зміни на тканинному і клітинному рівнях [8, 26, 28, 37], що призводять до більш економного використання O_2 .

У перші дні перебування в середньогір'ї при стандартних фізичних навантаженнях відбувається посилення анаеробного гліколізу і підвищення в крові і м'язовій тканині рівня лактату [21, 32]. Через два-три тижні інтенсивність гліколізу і утворення лактату при таких же навантаженнях знижується і наближається до умов рівнини. Одночасно відзначається підвищення вмісту вільних жирних кислот в м'язовій тканині [32, 38, 50] і поліпшується метаболічна регуляція процесів енергозабезпечення [18, 26, 43, 47].

На думку деяких дослідників [9, 11, та інші], при м'язовій діяльності в горах основним чинником, що обмежує надходження O_2 в працюючий організм, є неможливість в значній мірі збільшувати легеневу вентиляцію (ЛВ). При виконанні однакової роботи вона зростає в суворій відповідності до висоти [7, 10, 17, 20]. Так, при навантаженні зі споживанням кисню 2 л/хв для рівня моря автори наводять значення ЛВ – 48 л, для висоти 2810 м – 69 л, 3660 м – 83 л, 4700 м – 110 л / хв.

Здавалося б, як впливає з цих даних, обмежувальним фактором працездатності є не зниження інтенсивності окислювальних процесів в працюючих м'язах і не погіршення продуктивності серця, а межа можливості збільшення ЛВ.

Проте, хоч як не переконливі ці дослідження, вони не розкривають причин, що лімітують працездатність на великих висотах в горах. Згідно з літературними даними, зниження МСК і граничної потужності механічної роботи не завжди залежить від можливості збільшувати ЛВ, а певну обмежувальну роль при цьому грає зниження альвеолярно-капілярної дифузії, яке відбувається внаслідок зменшення градієнта PO_2 [2, 15 та інші].

Завдяки аналітичним розрахункам [10, 29] було проаналізовано значення деяких компенсаторних механізмів в підтримці PO_2 в альвеолярному повітрі і артеріальній крові при різному зниженні PO_2 у вдихуваному повітрі. Показано, що при відсутності компенсаторних впливів, зміна PO_2 на цих етапах його шляху в організмі пропорційна його

зниженню у вдихуваному повітрі, але коефіцієнт пропорційності неоднаковий. При цьому посилення вентиляції не повністю компенсує зниження вмісту O_2 у вдихуваному повітрі до 12 і тим більше 10 і 8 об.% (еквівалентно висотам 4500, 5800 і 7500 м н.р.м.), так як PO_2 в артеріальній крові виявляється нижче «критичних рівнів» [15]. Зміни режиму дихання (різних поєднань його частоти і дихального об'єму) не грають суттєвої ролі в компенсаторному ефекті збільшення ЛВ. Ці дослідження свідчать, якщо PO_2 у вдихуваному повітрі знижується до 125-120 мм рт.ст., що має місце в середньогір'ї на висотах до 2000 м н.р.м., в спокої організм може обійтися без помітного збільшення ЛВ і СВК, оскільки в цих умовах кисневі параметри артеріальної крові, а також в працюючих м'язах вище «критичних рівнів» [8]. При зниженні PO_2 у вдихуваному повітрі до 90 мм рт.ст. (на висотах близько 4000 м н.р.м.), без вираженого збільшення ЛВ і системного кровотоку, PO_2 в крові і тканинах виявляється нижче «критичного рівня».

Тільки інтенсивна активність компенсаторних механізмів може запобігти в цих умовах розвитку тканинної гіпоксії. Їх ефективність при подальшому зменшенні PO_2 у вдихуваному повітрі знижується. Якщо воно стає нижче 76 мм рт.ст. ніяке посилення вентиляції і підвищення швидкості кровотоку, за розрахунками цих авторів, не можуть запобігти розвитку тканинної гіпоксії.

Розрахунки, проведені за методом Runge-Kutta [9, 36, 37], показали, що якщо в спокої на рівні моря насичення гемоглобіну O_2 в процесі проходження еритроцита по легеневому капіляру відбувається за 0,7 с, то при барометричному тиску 250 мм рт.ст. – за 0,2 с. При цьому звичайно капілярний PO_2 не доходить до рівня в альвеолярному повітрі (градієнт становить близько 6 мм рт.ст.). Тобто, якщо навіть в умовах спокою обмежується дифузія O_2 в легенях, то при м'язовій діяльності, в результаті збільшення O_2 -запиту, ситуація, природно, погіршується. При цьому дифузійна здатність легень знижується на 45% [2, 15].

Є відомості про те [3, 7, 9, 10, 37, 45 та інші], що при роботі в умовах низького PO_2 між рівнем ЛВ і ступенем оксигенації артеріальної крові немає пропорційної залежності – вентиляція зростає в більшій мірі ніж споживання O_2 і прогресуюче знижується оксигенація. Це, очевидно, відбувається не тільки через зниження дифузійної здатності, а й через зростання шунтування крові в легенях [15]. На великих висотах в горах навіть в спокої, внаслідок вазоконстрикції легеневих судин, підвищується легеневий артеріальний тиск, зростає кровонаповнення легенів, підвищується в'язкість крові, що при навантаженні призводить до розвитку легеневої гіпертензії [11]. Тобто, зниження МСК в горах не завжди є наслідком обмежених вентиляційних можливостей легень. За даними ряду авторів [24, 28], ЛВ при фізичному навантаженні зростає в лінійній залежності від продукції CO_2 . Тому в гірських умовах значну роль в обмеженні вентиляторної відповіді на навантаження може грати підвищене його вимивання [2, 20, 29], при цьому нахил графіка залежності ЛВ від швидкості виділення CO_2 в горах змінюється [28]. Ці ж дослідники виявили високий ступінь кореляції зі зниженням оксигенації крові, що відтікає від працюючих м'язів. Крім того, в горах відбувається перебудова регуляції дихання при м'язовій діяльності, в результаті чого зростає використання O_2 в легенях [11, 20]. Тобто, збільшення ЛВ в горах необхідно в першу чергу не тільки для того, щоб збільшити PO_2 в альвеолах, але і для того, щоб забезпечити надходження до них необхідної кількості O_2 . Але, через велику енергетичну вартість посилення роботи дихальних м'язів, таке підвищення вентиляції виявляється неефективним. Показано [2], що ЛВ при МСК зростає в горах лише до висоти близько 6000 м н.р.м., а потім вона прогресуюче знижується. Проведені розрахунки [4, 36] вказують на те, що навіть в спокої на такій висоті ніяке посилення вентиляції не забезпечує необхідний рівень PO_2 в альвеолярному повітрі і артеріальній крові, що призводить до розвитку важкої тканинної гіпоксії. З огляду на те, що при рівнях вентиляції понад 120 л/хв на роботу дихання витрачається до 20-25% всього споживаного O_2 , а при 150 л/хв ця величина може досягати 50% і більше [10,], значно підвищується киснева вартість роботи, а економічність функції зовнішнього дихання падає. Відомо [10, 11], що навіть в спокої на висоті 4500 м н.р.м. кожен

літр споживаного O₂ вилучається з майже в два рази більших кількостей вентилюваного через легені повітря, ніж на рівні моря (28-30л – на рівнині і 55-60л – в горах).

У горах при навантаженнях субмаксимальної і максимальної інтенсивності SpO₂ знижується не тільки в результаті обмеження можливостей надходження O₂ в легені і альвеоли, але і в результаті зменшення градієнта PO₂ між альвеолярним повітрям і кров'ю, лімітуючої ролі дифузійної здатності легень для його переходу до крові, зниженого ступеня оксигенації артеріальної крові, погіршення продуктивності роботи серця [20, 46, 50] і інших чинників.

Відомості про прямі виміри систолічного об'єму крові (СОК) і СВК в горах при напруженій м'язовій діяльності майже відсутні. Але є вказівки на те, що СВК не може бути збільшеним більше, ніж на рівні моря, тому роль серця в компенсації нестачі O₂ обмежена [16, 28]. Також відомо, що при стандартній роботі в горах частота серцевих скорочень (ЧСС) виявляється більшою, ніж на рівні моря [10, 16, 45], хоча впрацювання при цьому навіть у спортсменів сповільнюється в порівнянні з тим, що спостерігається на рівні моря [48]. Навпаки, при навантаженнях з МСК в горах, як правило, ЧСС не досягає значень, зареєстрованих на рівні моря [1]. До цих пір механізм зниження максимальної ЧСС в горах залишається в повному обсязі не виявленим, хоча, на думку одних авторів [43], він обумовлений збереженням тону парасимпатичної нервової системи, інших [33, 38] – пов'язаний з уповільненням антріовентрікулярної провідності у зв'язку з гіпоксемією. Очевидно, можливі й інші пояснення.

При аналізі ролі кровотоку при МСК в горах розраховано [44], що для збільшення швидкості споживання кисню на 8-10% необхідна майже на 50% вища об'ємна швидкість кровотоку. Тобто, хоча внесок системної гемодинаміки в забезпечення працюючих тканин O₂ при МСК є вагомим, необхідна участь і інших механізмів. Показано [16, 33], що при роботі субмаксимальної потужності в умовах барокамери (тиск 464 мм рт.ст.) ЧСС і СВК виявляються більшими, ніж в умовах нормоксії. Ці ж автори, при проведенні досліджень в горах на висоті 4350 м н.р.м., тобто такій яка утворювалася в барокамері, показали, що СВК на 2-й день після переїзду виявився зниженим на 16%, а на 10-й день - на 29% в порівнянні з тим, що був на рівні моря. Максимальна ЧСС при цьому також була значно нижче, а СОК на 2-й і 10-й дні був меншим на 13 і 24%. Тобто в регуляції роботи серцевого м'яза певний вплив має перебудова вегетативної регуляції.

У зв'язку зі зменшенням в горах СОК при напруженій м'язовій діяльності, виникає питання про те, що є цьому причиною при нестачі O₂ у вдихуваному повітрі – підвищення периферичного опору?, порушення скорочувальної здатності міокарда?, зміна умов для енергоутворення в серцевому м'язі?, або інші чинники? Дані літератури [33] про зміну систолічного артеріального тиску при м'язовій діяльності в горах свідчать про те, що він мало відрізняється від того, що зазвичай спостерігається на рівні моря, тому питання про те, що для збільшення СОК є труднощі з боку периферії, є неспроможними.

Електрокардіографічні дослідження [33] свідчать про те, що в горах, на відміну від рівня моря, відразу після дозованої роботи з'являються ознаки погіршення коронарного кровопостачання, на кардіограмі знижується інтервал ST, відбувається сплюснення зубця Т, вкорочується механічна систола, збільшується відношення періоду довигнання до часу вигнання крові з серця.

Дослідження, проведені на смужках міокарда і на ізольованих препаратах папілярного м'язу щурів, дозволили диференціювати роль нервових і гуморальних впливів на регуляцію серця при скороченні в гіпоксичних умовах в залежності від морфофункціональних та біохімічних зрушень на тканинному рівні [38]. Так, в умовах високогір'я сила і ступінь укорочення папілярних м'язів істотно змінюються: зменшується сила максимального напруження, знижується можливість досягнення максимальної частоти скорочення м'язів на пропоновану стимуляцію. Поєднання впливу силового навантаження і частоти подразнення призводить до зменшення амплітуди укорочення, зниження працездатності м'яза на 38-45%.

Зниження скорочувальної активності серця в горах можна пояснити прямим впливом гіпоксемії: знижується швидкість окислення і окисного фосфорилування в мітохондріях міокарда, дихального і окисного фосфорилування для НАД-залежних субстратів. Дефіцит енергії, на думку деяких дослідників [30, 41], є основним моментом у розвитку ранніх гіпоксичних порушень в міокарді. Представлені результати дозволяють в деякій мірі пояснити причини ослаблення скорочувальних можливостей серця під час напруженої м'язової діяльності в горах.

Таким чином, літературні дані свідчать про те, що в горах порушуються умови функціонування міокарда, що проявляється в погіршенні його скорочувальної здатності і зниженні можливості забезпечити при напруженій м'язовій діяльності таку як на рівні моря швидкість масопереносу респіраторних газів кров'ю.

З метою оцінки можливості збільшення швидкості доставки O_2 до посилено функціонуючих м'язів при фізичній роботі в горах необхідно враховувати і роль перерозподілу кровотоку в організмі. Виявлено, що він відрізняється від того, що спостерігається при нормальному PO_2 у вдихуваному повітрі. Визначення регіонарного кровотоку у щурів за допомогою Cs^{137} відразу після навантаження плаванням показали, що в гіпоксичному середовищі в більшій мірі, ніж зазвичай, збільшується кровоток через працюючі скелетні м'язи, діафрагму, міокард [30]. Аналогічні результати були отримані і при вивченні периферичного кровотоку у людей на висоті 3500 м н.р.м. в процесі навантажень помірної інтенсивності [49].

В результаті обмеження кровотоку через печінку і нирки в значній мірі знижується швидкість утилізації молочної кислоти, що утворюється в працюючих м'язах. При цьому в крові збільшується концентрація іонів водню, зсувається кислотно-лужний стан (КЛС) в м'язах і крові та порушуються умови для утилізації O_2 [30].

Якщо врахувати, що в горах в здоровому організмі в спокої спостерігається газовий алкалоз, викликаний посиленням функції зовнішнього дихання і розвитком гіпокапнії, і відбувається посилене вимивання нирками лугів, зменшення ємності бикарбонатного резерву призводить до того, що при напруженій м'язовій діяльності до погіршеної здатності нирок і печінки утилізувати молочну кислоту приєднується і зменшена здатність з'єднувати солі кислоти, що при цьому утворюються [11].

Аналізуючи роль інших факторів, що лімітують МСК і працездатність в горах, не слід забувати і про ефект поліцитемії. Так, з одного боку, підвищення концентрації Hb в крові призводить до зростання кисневої ємності крові, покращує транспортні можливості крові при м'язовій діяльності, а з іншого, гемоконцентрація і підвищена у зв'язку з цим в'язкість крові призводять до того, що при певних рівнях об'ємної швидкості кровотоку через працюючі м'язи і легеневі капіляри він в значній мірі ускладнюється [31, 34].

Серед чинників, що забезпечують підвищення працездатності і МСК при тренуванні в горах, є васкуляризація і пов'язане з нею збільшення капілярного кровотоку в м'язах [1, 14, 41]. При цьому включення числа активних капілярів на одиницю поперечного перерізу може бути результатом ангиогенезу [46]. Також при адаптації відбувається деяка функціональна реорганізація судинного русла м'язів [19, 46], що збільшує нутритивний кровоток і полегшує дифузію респіраторних газів. Крім того, можливо, збільшення вмісту Mv в тканинах підсилює дифузію газів в ділянках, найбільш віддалених від кровоносних судин [45].

Можна стверджувати про те, що регуляція кисневого постачання організму при фізичних навантаженнях в процесі адаптації до гіпоксії відбувається як на системному рівні, так і на рівні тканин [24, 30]: відбувається економізація всієї системи дихання, розширюються механізми регуляції процесу масоперенесення респіраторних газів.

Таким чином, при напруженій м'язовій діяльності в горах, в результаті зниженого PO_2 у вдихуваному повітрі відбуваються зміни функціонування практично усіх фізіологічних систем, які приймають участь в забезпеченні процесу масопереносу респіраторних газів в організмі. Але, незважаючи на це, в літературі безпосередньо відсутня

комплексна оцінка цілісного процесу динаміки масопереноса респіраторних газів при фізичній роботі в зонах різної потужності в залежності від висоти над рівнем моря, його відмінності в порівнянні з розвитком гіпоксії навантаження на рівні моря. Останнє буде представлено в наступній публікації.

Внесок авторів: Всі автори брали рівну участь у розробці концепції, пошуку літератури, методології, написанні та редагуванні цієї статті, прочитали і погодилися з опублікованою версією рукопису.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ільїн В. М., Філіппов М.М., Клименко Г.В. Перебудови в системі дихання спортсменів при адаптації до середньогір'я // *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. Budapest, 2019. VI(22), Issue: 193. P. 69-72. <https://doi.org/10.31174/SEND-NT2019-193VII23-17>.
2. Портниченко В., Ільїн В., Філіппов М., Коваль С. Стан регуляторних процесів організму бігунів на середні дистанції після тренувань в умовах середньогір'я. // *Теорія і методика фізичного виховання і спорту*. 2021;1;61-66. <https://doi.org/10.32652/tmfvs.2021.1.61-66>.
3. Сосновский В. В. Пастухова В. А., Філіппов М. М., Ільїн В. М. Аналіз спектрів потужності варіабельності серцевого ритму у спортсменів під час початкової адаптації до умов гірської гіпоксії. // *Science and education a new dimension. Natural and Technical Sciences*. - VI(22), Issue: 186, 2018 Dec.-P. 42-45. <https://doi.org/10.31174/SEND-NT2018-186VI22>.
4. Філіппов М. М., Ільїн В. М., Портниченко В. І., Лук'янцева Г. В. Системні зміни в організмі спортсменів, які впливають на масоперенесення респіраторних газів при м'язовій діяльності в горах. // *Вісник проблем біології і медицини*, 2019. Вип. 2, том 2 (151). С. 64-71. <https://doi.org/10.29254/2077-4214-2019-2-2-151-64-71.13>
5. Azad, P.; Stobdan, T.; Zhou, D.; Hartley, I.; Akbari, A.; Bafna, V.; Haddad, G.G. High-altitude adaptation in humans: From genomics to integrative physiology.// *J. Mol. Med.* 2017, 95, 1269–1282. <https://doi.org/10.1007/s00109-017-1584-7>.
6. Basak N., Norboo T., Mustak M.S., Thangaraj K. Heterogeneity in Hematological Parameters of High and Low Altitude Tibetan Populations. *J. Blood Med.* 2021, 12, 287–298. <https://doi.org/10.2147/jbm.S294564>.
7. Beretta E., Lanfrancioni F., Grasso G.S., Bartesaghi M., Alemayehu H.K., Pratali L. et al. Air blood barrier phenotype correlates with alveolo-capillary O₂ equilibration in hypobaric hypoxia // *Respir Physiol Neurobiol*. 2017 Dec;246:53-58. doi: 10.1016/j.resp.2017.08.006.
8. Beretta E., Grasso G.S., Forcaia, G., Sancini, G., Miserocchi, G. Differences in alveolo-capillary equilibration in healthy subjects on facing O₂ demand. *Sci. Rep.* 2019, 9, 16693. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52679-4>.
9. Bartscher J., Mallet R.T., Pialoux V., Millet G.P., Bartscher M. Adaptive Responses to Hypoxia and/or Hyperoxia in Humans. *Antioxid. Redox Signal.* 2022, 37, 887–912. <https://doi.org/10.1089/ars.2021.028>.
10. Dominelli P.B., Wiggins C.C., Roy T.K., Secomb T.W., Curr, T.B., Joyner, M.J. The Oxygen Cascade During Exercise in Health and Disease. *Mayo Clin. Proc.* 2021, 96, 1017–1032. <https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2020.06.063>.
11. Fitzgerald R.S., Rocher A. Physiology and Pathophysiology of Oxygen Sensitivity. *Antioxidants*. 2021, 10, 1114. <https://doi.org/10.3390/antiox10071114.2>.
12. Gao L., Ortega-Sáenz P., Moreno-Domínguez A., López-Barneo J. Mitochondrial Redox Signaling in O₂-Sensing Chemoreceptor Cells. *Antioxid. Redox Signal.* 2022, 37, 274–289. <https://doi.org/10.1089/ars.2021.0255>.
13. Lemieux P., Birot O. Altitude, Exercise, and Skeletal Muscle Angio-Adaptive Responses to Hypoxia: A Complex Story. *Front. Physiol.* 2021, 12, 735557. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.735557>.
14. Leonard E.M., Salman S., Nurse, C.A. Sensory Processing and Integration at the Carotid Body Tripartite Synapse: Neurotransmitter Functions and Effects of Chronic Hypoxia. *Front. Physiol.* 2018, 9, 225. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00225>.
15. Li Y., Wang, Y. Effects of Long-Term Exposure to High Altitude Hypoxia on Cognitive Function and Its Mechanism: A Narrative Review. *Brain Sci.* 2022, 12, 808. <https://doi.org/10.3390/brainsci12060808>.
16. López-Barneo J., Ortega-Sáenz P. Mitochondrial acute oxygen sensing and signaling. *Crit. Rev. Biochem. Mol. Biol.* 2022, 57, 205–225. <https://doi.org/10.1080/10409238.2021>.
17. Marquis A.D., Jezek F., Pinsky D.J., Beard D.A. Hypoxic pulmonary vasoconstriction as a regulator of alveolar-capillary oxygen flux: A computational model of ventilation-perfusion matching.// *PLoS Comput. Biol.* 2021, 17, e1008861. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1008861>.
18. Murray A.J., Montgomery H.E., Feelisch M., Grocott M.P.W., Martin D.S. Metabolic adjustment to high-altitude hypoxia: From genetic signals to physiological implications. // *Biochem. Soc. Trans.* 2018, 46, 599–607. <https://doi.org/10.1042/BST20170502>.
19. Jacobs R.A., Lundby A.K., Fenk S., Gehrig S., Siebenmann C., Fluck D., Kirk, N., Hilty M.P., Lundby C. Twenty-eight days of exposure to 3454 m increases mitochondrial volume density in human skeletal muscle. *J. Physiol.* 2016, 594, 1151–1166. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.2012.066092>.

20. Ora J., Rogliani P., Dauri M., O'Donnell D. Happy hypoxemia, or blunted ventilation? *Respir. Res.* 2021, 22, 4. <https://doi.org/10.1186/s12931-020-01604-9>.
21. Pena E., El Alam S., Siques P., Brito, J. Oxidative Stress and Diseases Associated with High-Altitude Exposure. *Antioxidants*. 2022, 11, 267. <https://doi.org/10.3390/antiox11020267>.
22. Pilotto, A.M., Adami A., Mazzolari R., Brocca L., Crea E., Zuccarelli L., Pellegrino M.A., Bottinelli R., Grassi B., Rossiter H.B. et al. Near-infrared spectroscopy estimation of combined skeletal muscle oxidative capacity and O(2) diffusion capacity in humans. *J. Physiol.* 2022, 600, 4153–4168. <https://doi.org/10.1113/jp283267>.
23. Poole D.C., Kano Y., Koga S., Musch T.I., August Krogh: Muscle capillary function and oxygen delivery. *Comp. Biochem. Physiol. A Mol. Integr. Physiol.* 2021, 253, 110852. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2020.110852>.
24. Poole D.C., Musch T.I., Colbu, T.D. Oxygen flux from capillary to mitochondria: Integration of contemporary discoveries. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2022, 122, 7–28. <https://doi.org/10.1007/s00421-021-04854-7>.
25. Richalet J.P., Hermand E. Modeling the oxygen transport to the myocardium at maximal exercise at high altitude. *Physiol. Rep.* 2022, 10, e15262. <https://doi.org/10.14814/phy2.15262>.
26. Tremblay J.C., Ainslie P.N. Global and country-level estimates of human population at high altitude. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2021. <https://doi.org/10.1073/pnas.2102463118>.
27. Samaja M., Ottolenghi S. The Oxygen Cascade from Atmosphere to Mitochondria as a Tool to Understand the (Mal)adaptation to Hypoxia. *Int. J. Mol. Sci.* 2023, 24, 3670. <https://doi.org/10.3390/ijms24043670>.
28. Siebenmann C., Lundby C. Regulation of cardiac output in hypoxia. *Scand J. Med. Sci. Sport* 2015, 25 (Suppl. 4), 53–59. <https://doi.org/10.1111/sms.12619>.
29. Siebenmann C. CK, Oberholzer L., Fisher J.P., Hilsted L...M, Rasmussen P. et al. Hypoxia-induced vagal withdrawal is independent of the hypoxic ventilatory response in men. *J. Appl. Physiol.* 2019 Jan. 1; 126(1):124–131. doi: 10.1152/japplphysiol.00701.2018.
30. Sinex J. A., & Chapman R. F. Hypoxic training methods for improving endurance exercise performance. *Journal of Sport and Health Science*, 2015, 4(4), 325–332. doi:10.1016/j.jshs.2015.07.005.
31. Sosnovsky V.V., Pastukhova V.A., Pornichenko V.I., Filippov M.M., Ilyin V.M. Effects of medium-height mountain training on the functional abilities and physical fitness of mid-distance runners. *Journal of Physical Education and Sport*® (JPES), 2019, Vol.19 (4), Art 360, pp. 2379 - 2383, ISSN:2247-806X;p-ISSN:2247–8051;ISSN-L=2247-8051c JPES.
32. Stembridge M., Ainslie P.N., Shave R. Mechanisms underlying reductions in stroke volume at rest and during exercise at high altitude. *Eur. J. Sport. Sci.* 2016, 16, 577–584. <https://doi.org/10.1080/17461391.2015.1071876>.
33. Theunissen S., Balestra C., Bolognesi S., Borgers G., Vissenaeken D., Obeid G., Germonpré P., Honoré P.M., De Bel D. Effects of Acute Hypobaric Hypoxia Exposure on Cardiovascular Function in Unacclimatized Healthy Subjects: A “Rapid Ascent” Hypobaric Chamber Study. *Int. J. Env. Res. PublicHealth* 2022, 19, 5394. <https://doi.org/10.3390/ijerph19095394>
34. Wagner P.D. Reduced maximal cardiac output at altitude--mechanisms and significance. *Respir. Physiol.* 2000, 120, 1–11. [https://doi.org/10.1016/s0034-5687\(99\)00101-2](https://doi.org/10.1016/s0034-5687(99)00101-2).
35. Simonso T.S., Bermudez D., León-Velarde F. High-Altitude Erythrocytosis: Mechanisms of Adaptive and Maladaptive Responses. *Physiology* 2022, 37, 175–186. <https://doi.org/10.1152/physiol.00029.2021>.
36. Vizcardo-Galindo G., Leon-Velarde F., Villafuert F.C. High-Altitude Hypoxia Decreases Plasma Erythropoietin Soluble Receptor Concentration in Lowlanders. *High Alt. Med. Biol.* 2020, 21, 92–98. <https://doi.org/10.1089/ham.2019.0118>.
37. West J. B. Oxygen Conditioning: A New Technique for Improving Living and Working at High Altitude. *Physiology* 2016, 31, 216–222. <https://doi.org/10.1152/physiol.00057.2015>.
38. Wiggins C.C., Constantini K., Paris H.L., Mickleborough T.D., Chapman R.F. Ischemic Preconditioning, O₂ Kinetics, and Performance in Normoxia and Hypoxia. *Med Sci Sports Exerc.* 2019 May;51(5):900–911. doi: 10.1249/MSS.0000000000001882.

REFERENCES

1. Ilyin B. M., Filippov M.M., Klimenko G.V. Restructuring in the respiratory system of athletes during adaptation to the middle mountains // *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. Budapest, 2019. VI(22), Issue: 193. P. 69–72. <https://doi.org/10.31174/SEND-NT2019-193VII23-17>.
2. Portnychenko V., Ilyin V., Filippov M., Koval S. The state of regulatory processes in the body of middle-distance runners after training in the middle mountains. 2021;1;61–66. <https://doi.org/10.32652/tmfvs.2021.1.61-66>.
3. Sosnovsky VV, Pastukhova VA, Filippov MM, Ilyin VM Analysis of power spectra of heart rate variability in athletes during initial adaptation to conditions of mountain hypoxia. *Natural and Technical Sciences*. - VI(22), Issue: 186, 2018 Dec.-P. 42–45. <https://doi.org/10.31174/SEND-NT2018-186VI22>.
4. Filippov M. M., Ilyin V. M., Portnychenko V. I., Lukyantseva G. V.. Systemic changes in the body of athletes that affect the mass transfer of respiratory gases during muscle activity in the mountains. Issue 2, volume 2 (151). C. 64–71. <https://doi.org/10.29254/2077-4214-2019-2-2-151-64-71>.
5. Azad, P.; Stobdan, T.; Zhou, D.; Hartley, I.; Akbari, A.; Bafna, V.; Haddad, G.G. High-altitude adaptation in humans: From genomics to integrative physiology.// *J. Mol. Med.* 2017, 95, 1269–1282. <https://doi.org/10.1007/s00109-017-1584-7>.

6. Basak N., Norboo T., Mustak M.S., Thangaraj K. Heterogeneity in Hematological Parameters of High and Low Altitude Tibetan Populations. *J. Blood Med.* 2021, 12, 287–298. <https://doi.org/10.2147/jbm.S294564>.
7. Beretta E., Lanfranconi F., Grasso G.S., Bartesaghi M., Alemayehu H.K., Pratali L. et al. Air blood barrier phenotype correlates with alveolo-capillary O₂ equilibration in hypobaric hypoxia // *Respir Physiol Neurobiol.* 2017 Dec;246:53-58. doi: 10.1016/j.resp.2017.08.006.
8. Beretta E., Grasso G.S., Forcaia G., Sancini, G., Miserocchi, G. Differences in alveolo-capillary equilibration in healthy subjects on facing O₂ demand. *Sci. Rep.* 2019, 9, 16693. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52679-4>.
9. Bartscher J., Mallet R.T., Pialoux V., Millet G.P., Bartscher M. Adaptive Responses to Hypoxia and/or Hyperoxia in Humans. *Antioxid. Redox Signal.* 2022, 37, 887–912. <https://doi.org/10.1089/ars.2021.028>.
10. Dominelli P.B., Wiggins C.C., Roy T.K., Secomb T.W., Curr, T.B., Joyner, M.J. The Oxygen Cascade During Exercise in Health and Disease. *Mayo Clin. Proc.* 2021, 96, 1017–1032. <https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2020.06.063>.
11. Fitzgerald R.S., Rocher A. Physiology and Pathophysiology of Oxygen Sensitivity. *Antioxidants.* 2021, 10, 1114. <https://doi.org/10.3390/antiox10071114.2>.
12. Gao L., Ortega-Sáenz P., Moreno-Domínguez A., López-Barneo J. Mitochondrial Redox Signaling in O₂-Sensing Chemoreceptor Cells. *Antioxid. Redox Signal.* 2022, 37, 274–289. <https://doi.org/10.1089/ars.2021.0255>.
13. Lemieux P., Birot O. Altitude, Exercise, and Skeletal Muscle Angio-Adaptive Responses to Hypoxia: A Complex Story. *Front. Physiol.* 2021, 12, 735557. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.735557>.
14. Leonard E.M., Salman S., Nurse, C.A. Sensory Processing and Integration at the Carotid Body Tripartite Synapse: Neurotransmitter Functions and Effects of Chronic Hypoxia. *Front. Physiol.* 2018, 9, 225. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00225>.
15. Li Y., Wang Y. Effects of Long-Term Exposure to High Altitude Hypoxia on Cognitive Function and Its Mechanism: A Narrative Review. *Brain Sci.* 2022, 12, 808. <https://doi.org/10.3390/brainsci12060808>.
16. López-Barneo J., Ortega-Sáenz P. Mitochondrial acute oxygen sensing and signaling. *Crit. Rev. Biochem. Mol. Biol.* 2022, 57, 205–225. <https://doi.org/10.1080/10409238.2021>.
17. Marquis A.D., Jezek F., Pinsky D.J., Beard D.A. Hypoxic pulmonary vasoconstriction as a regulator of alveolar-capillary oxygen flux: A computational model of ventilation-perfusion matching. // *PLoS Comput. Biol.* 2021, 17, e1008861. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1008861>.
18. Murray A.J., Montgomery H.E., Feelisch M., Grocott M.P.W., Martin D.S. Metabolic adjustment to high-altitude hypoxia: From genetic signals to physiological implications. // *Biochem. Soc. Trans.* 2018, 46, 599–607. <https://doi.org/10.1042/BST20170502>.
19. Jacobs R.A., Lundby A.K., Fenk S., Gehrig S., Siebenmann C., Fluck D., Kirk, N., Hilty M.P., Lundby C. Twenty-eight days of exposure to 3454 m increases mitochondrial volume density in human skeletal muscle. *J. Physiol.* 2016, 594, 1151–1166. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.2012.066092>.
20. Ora J., Rogliani P., Dauri M., O'Donnell D. Happy hypoxemia, or blunted ventilation? *Respir. Res.* 2021, 22, 4. <https://doi.org/10.1186/s12931-020-01604-9>.
21. Pena E., El Alam S., Siques P., Brito, J. Oxidative Stress and Diseases Associated with High-Altitude Exposure. *Antioxidants.* 2022, 11, 267. <https://doi.org/10.3390/antiox11020267>.
22. Pilotto, A.M., Adami A., Mazzolari R., Brocca L., Crea E., Zuccarelli L., Pellegrino M.A., Bottinelli R., Grassi B., Rossiter H.B. et al. Near-infrared spectroscopy estimation of combined skeletal muscle oxidative capacity and O₂ diffusion capacity in humans. *J. Physiol.* 2022, 600, 4153–4168. <https://doi.org/10.1113/jp283267>.
23. Poole D.C., Kano Y., Koga S., Musch T.I., August Krogh: Muscle capillary function and oxygen delivery. *Comp. Biochem. Physiol. A Mol. Integr. Physiol.* 2021, 253, 110852. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2020.110852>.
24. Poole D.C., Musch T.I., Colbu, T.D. Oxygen flux from capillary to mitochondria: Integration of contemporary discoveries. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2022, 122, 7–28. <https://doi.org/10.1007/s00421-021-04854-7>.
25. Richalet J.P., Hermard E. Modeling the oxygen transport to the myocardium at maximal exercise at high altitude. // *Physiol. Rep.* 2022, 10, e15262. <https://doi.org/10.14814/phy2.15262>.
26. Tremblay J.C., Ainslie P.N. Global and country-level estimates of human population at high altitude. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2021. <https://doi.org/10.1073/pnas.2102463118>.
27. Samaja M., Ottolenghi S. The Oxygen Cascade from Atmosphere to Mitochondria as a Tool to Understand the (Mal)adaptation to Hypoxia. // *Int. J. Mol. Sci.* 2023, 24, 3670. <https://doi.org/10.3390/ijms24043670>.
28. Siebenmann C., Lundby C. Regulation of cardiac output in hypoxia. // *Scand J. Med. Sci. Sport* 2015, 25 (Suppl. 4), 53–59. <https://doi.org/10.1111/sms.12619>.
29. Siebenmann C. CK, Oberholzer L., Fisher J.P., Hilsted L...M, Rasmussen P. et al. Hypoxia-induced vagal withdrawal is independent of the hypoxic ventilatory response in men. // *J. Appl. Physiol.* 2019 Jan. 1; 126(1):124–131. doi: 10.1152/japplphysiol.00701.2018.
30. Sinex J. A., & Chapman R. F. Hypoxic training methods for improving endurance exercise performance. // *Journal of Sport and Health Science*, 2015, 4(4), 325–332. doi:10.1016/j.jshs.2015.07.005.
31. Sosnovsky V.V., Pastukhova V.A., Pornichenko V.I., Filippov M.M., Ilyin V.M. Effects of medium-height mountain training on the functional abilities and physical fitness of mid-distance runners. // *Journal of Physical Education and Sport* ® (JPES), 2019, Vol.19 (4), Art 360, pp. 2379 - 2383, ISSN:2247-806X;p-ISSN:2247-8051;ISSN-L=2247-8051c JPES.

32. Stembridge M., Ainslie P.N., Shave R. Mechanisms underlying reductions in stroke volume at rest and during exercise at high altitude. *Eur. J. Sport. Sci.* 2016, 16, 577–584. [https://doi.org/ 10.1080/17461391.2015.1071876](https://doi.org/10.1080/17461391.2015.1071876).
33. Theunissen S., Balestra C., Bolognesi S., Borgers G., Vissenaeken D., Obeid G., Germonpré P., Honoré P.M., De Bel D. Effects of Acute Hypobaric Hypoxia Exposure on Cardiovascular Function in Unacclimatized Healthy Subjects: A “Rapid Ascent” Hypobaric Chamber Study. *Int. J. Env. Res. PublicHealth* 2022, 19, 5394. <https://doi.org/10.3390/ijerph19095394>
34. Wagner P.D. Reduced maximal cardiac output at altitude--mechanisms and significance. *Respir. Physiol.* 2000, 120, 1–11. [https://doi.org/10.1016/s0034-5687\(99\)00101-2](https://doi.org/10.1016/s0034-5687(99)00101-2).
35. Simonso T.S., Bermudez D., León-Velarde F. High-Altitude Erythrocytosis: Mechanisms of Adaptive and Maladaptive Responses. *Physiology* 2022, 37, 175–186. <https://doi.org/10.1152/physiol.00029.2021>.
36. Vizcardo-Galindo G., Leon-Velarde F., Villafuente F.C. High-Altitude Hypoxia Decreases Plasma Erythropoietin Soluble Receptor Concentration in Lowlanders. *High Alt. Med. Biol.* 2020, 21, 92–98. <https://doi.org/10.1089/ham.2019.0118>.
37. West J. B. Oxygen Conditioning: A New Technique for Improving Living and Working at High Altitude. *Physiology* 2016, 31, 216–222. <https://doi.org/10.1152/physiol.00057.2015>.
38. Wiggins C.C., Constantini K., Paris H.L., Mickleborough T.D., Chapman R.F. Ischemic Preconditioning, O₂ Kinetics, and Performance in Normoxia and Hypoxia. *Med Sci Sports Exerc.* 2019 May;51(5):900-911. doi: 10.1249/MSS.0000000000001882.

Filippov M.M., Ilyin V.M., Portnychenko V.I.

Functional factors providing conditions for mass transfer of respiratory gases during muscular activity in the mountains

Abstract. For the physiology of motor activity and sports, the theory of hypoxic states, it is important to clarify the mechanisms that ensure the process of mass transfer and O₂ utilization during muscle activity of varying intensity under conditions of reduced RO₂ in the inhaled air, and the peculiarities of meeting the increased O₂ demand of the body. A certain effectiveness of hypoxic training for improving functional capabilities of athletes and sports results both in sports related to the manifestation of endurance of athletes and in others has been proven in numerous works of researchers working in the field of sports physiology.

Objective. To analyze (on the basis of the literature review and own observations) the influence of changes in the body of sportsmen in the mountains on the conditions of providing mass transfer of respiratory gases during muscular activity of different intensity.

Methods. We analyzed the special scientific and methodological literature on the influence of the lack of O₂ in the inhaled air on the functioning of the external respiratory system, cardiovascular system, oxygen transport function of blood, tissue respiration, homeostatic characteristics, etc.

Results The main adaptive reactions of these systems in the mountains are considered, which ensure the supply of O₂ from the environment to the lungs, its combination with hemoglobin, its transportation with blood to the working organs, its release by hemoglobin and movement to the muscles, the conditions of O₂ consumption, the formation of CO₂ and its excretion from the body, and other processes. It can be argued that the regulation of oxygen supply to the body during exercise in the process of adaptation to hypoxia occurs both at the systemic level and at the tissue level: the entire respiratory system is economized, and the mechanisms for regulating the process of mass transfer of respiratory gases are expanded.

Thus, during strenuous muscle activity in the mountains, as a result of reduced RO₂ in the inhaled air, there are changes in the functioning of almost all physiological systems involved in ensuring the process of mass transfer of respiratory gases in the body.

Key words: mountains, adaptation, cardiorespiratory system, mass transfer of O₂ and CO₂, physical activity.

Надійшла до редакції / Received: 30.04.2025

Схвалено до друку / Accepted: 16.05.2025