

УДК 615.825:616

DOI <https://doi.org/10.32782/pub.health.2024.2.8>

Кіян Олександр Сергійович,
аспірант зі спеціальності 281 «Публічне
управління та адміністрування»,
кафедра права та публічного управління
Житомирського державного університету імені Івана Франка;
директор клініки «Центр стимуляції мозку»
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5769-4125>

ВПЛИВ ГІПОКСІТЕРАПІЇ (В УМОВАХ ГІРСЬКОГО ПОВІТРЯ) НА ФІЗИЧНУ РЕАБІЛІТАЦІЮ

Актуальність. Гіпоксітерапія – один із ефективних методів фізичної реабілітації. Гіпоксичні тренування використовують при різних порушеннях фізіологічної діяльності людини, а також можна використовувати людям похилого віку й вагітним жінкам.

Метою дослідження є дослідити шляхом аналізу літературних даних вплив різних гіпоксичних станів під час фізичної реабілітації, а саме: як умови високогірного повітря впливають на процес фізичної реабілітації.

Матеріали та методи. Для проведення цього оглядового дослідження використано систематичний тематичний бібліографічний огляд. Основним порталом для пошуку публікацій обрана база даних Scopus і Web of sciences. Крім того, ми шукали в бібліографії кожної статті, щоб включити більше досліджень, пов'язаних із темою. Усього проаналізовано 45 публікацій. Вивчені джерела класифіковані за їх фокусом. До дослідження включені публікації, що висвітлюють аспекти, пов'язані з впливом гіпоксітерапії (в умовах гірського повітря) на фізичну реабілітацію.

Результати дослідження. У роботі опрацьовано літературні джерела, де зібрано та проаналізовано найефективніші способи гіпоксітерапії, а також наведено результати ефективності гіпоксітерапії порівняно з традиційними методиками.

Висновки. Установлено, що гіпоксітерапія має низку позитивних впливів на організм людини. Сприяє активзації процесів кровотворення і збільшує кількість червоних кров'яних клітин, що покращує постачання кисню до тканин та органів. Це особливо важливо в процесі відновлення після травм або хірургічного втручання. Гіпоксія активує механізми, що знижують запалення. Це допомагає пришвидшити процес загоєння й відновлення після різних ушкоджень або захворювань особливо в м'язах і суглобах. За рахунок адаптації до умов зниженої концентрації кисню пацієнти підвищують свою фізичну витривалість, що є важливим аспектом у реабілітації після травм або операцій особливо для спортсменів. Гіпоксія стимулює обмін речовин і нервову систему. Гіпоксітерапія має велику кількість різноманітних підходів для профілактики та фізичної реабілітації хворих. Згідно з оглядом літератури, найбільш практичним є спосіб пасивних інтервальних гіпоксичних та інтервальних гіпоксично-гіпероксичних тренувань. Які в декілька разів ефективніші за інші способи лікування й поліпшення фізичного стану здоров'я людини.

Ключові слова: гіпоксітерапія, гіпоксичні тренування, реабілітація, медична реабілітація, фізична реабілітація.

Kiyan O. S. The impact of hypoxotherapy (in mountain air) on physical rehabilitation

Topicality. Hypoxia therapy is one of the most effective methods of physical rehabilitation. Hypoxic training is used for various disorders of human physiological activity, and can also be used by the elderly and pregnant women.

The aim of the study is to investigate the influence of various hypoxic conditions during physical rehabilitation, namely, how the conditions of high mountain air affect the process of physical rehabilitation.

Materials and methods. A systematic thematic bibliographic review was used to conduct this review study. The main portal for searching for publications was the Scopus and Web of sciences databases. In addition, we searched the bibliography of each article to include more studies related to the topic. A total of 45 publications were analysed. The sources studied were classified according to their focus. The study included publications covering aspects related to the impact of hypoxotherapy (in mountain air) on physical rehabilitation.

Results and discussion. The paper deals with the literature sources where the most effective methods of hypoxotherapy are collected and analysed. The results of the effectiveness of hypoxotherapy in comparison with traditional methods are also presented.

Conclusion. It has been established that hypoxia therapy has a number of positive effects on the human body. It promotes activation of haematopoiesis and increases the number of red blood cells, which improves oxygen supply to tissues and organs. This is especially important in the process of recovery from injury or surgery. Hypoxia activates mechanisms that reduce inflammation. This helps speed up the healing and recovery process after various injuries or diseases, especially in muscles and joints. By adapting to the conditions of reduced oxygen concentration, patients increase their physical endurance, which is an important aspect of rehabilitation after injuries or surgery, especially

for athletes. Hypoxia stimulates metabolism and stimulates the nervous system. Hypoxia therapy has a large number of different approaches for the prevention and physical rehabilitation of patients. According to the literature review, the most practical is the method of passive intermittent hypoxic training and intermittent hypoxic-hyperoxic training. They are several times more effective than other methods of treatment and improvement of the physical state of human health.

Key words: hypoxia therapy, hypoxic training, rehabilitation, medical rehabilitation, physical rehabilitation.

Вступ. Людський організм генетично запрограмований на виконання життєво важливих процесів в умовах нестачі кисню. Ця властивість зароджується ще в ембріональному періоді розвитку. Вона закладена генетично й забезпечується наявністю спеціальних ферментів. Звісно, після народження дитини її організм пристосовується до звичного типу обміну кисню, але властивість, яка запрограмована генетично, зберігається. Періодичне вдихання повітря зі зниженим вмістом кисню призводить до стійкості організму не тільки до гіпоксії, а й багатьох несприятливих факторів [1].

Проблема впливу на організм спортсменів в умовах пониженого вмісту кисню привернула увагу спеціалістів після визначення міста Мехіко столицею ігор XIX Олімпіади. Спершу інтереси дослідників обмежувалися лише проблемою акліматизації в умовах середньогір'я [2–3]. Проте результати експериментальних досліджень, виконаних в умовах середньогір'я та в умовах штучної гіпоксії, засвідчили, що інтервальне гіпоксичне тренування можна розглядати як засіб не лише ефективної мобілізації функціональних резервів організму, а й стимуляції адаптаційної перебудови їхнього організму [4–5].

Незважаючи на дослідження в галузі високогірної та експериментальної гіпоксії [6–9], дослідження адаптивної перебудови функцій організму людини під впливом гіпоксичних впливів досі не втрачають своєї наукової значущості як для екологічної та прикладної фізіології, так і для медицини. Особливий інтерес до вивчення фізіологічних ефектів інтервальних гіпоксичних впливів (тренувань) сприяє розширенню функціональних особливостей організму й корекції стану його фізіологічних систем [10].

Під час порівняння штучного та природного гіпоксичного впливу виявляється, що тренування в гірських умовах має не тільки переваги, а й недоліки. Серед переваг – значне підвищення аеробних та анаеробних можливостей організму, витривалості й рівня загальної працездатності після переїзду з гір на рівнину. Окрім організаційних і матеріальних ускладнень, до недоліків варто зарахувати необхідність тривалого перебування в горах для завершення адаптації, а також істотне зниження працездатності в перший тиж-

день перебування в горах. Окрім цього, перепади атмосферного тиску під час переїздів негативно впливають на стан центральної нервової й серцево-судинної систем [11–12].

Гіпоксітерапія – це один зі способів тренування організму, що підвищує його стійкість, підвищуючи не тільки фізичні, а й розумові показники. Завдяки чому досягається ефект лікування та профілактики багатьох захворювань. З огляду на вище наведене, стає зрозумілим, що використання гіпоксичних впливів позитивно впливає на процеси реабілітації.

Мета дослідження – дослідити шляхом аналізу літературних даних із цієї проблеми вплив різних гіпоксичних станів під час фізичної реабілітації, а саме: як умови високогірного повітря впливають на процес фізичної реабілітації.

Методи дослідження. Для проведення оглядового дослідження використано систематичний тематичний бібліографічний огляд. Основним порталом для пошуку публікацій обрана база даних Scopus і Web of sciences. Крім того, ми шукали в бібліографії кожної статті, щоб включити більше досліджень, пов'язаних із темою. Усього проаналізовано 45 публікацій. Вивчені джерела класифіковані за їх фокусом. До дослідження включені публікації, що висвітлюють аспекти, пов'язані з впливом гіпоксітерапії (в умовах гірського повітря) на фізичну реабілітацію.

Результати дослідження. При лікувально-профілактичних заходах реабілітація – це ланка продовження лікування. Вона передуює вторинній профілактиці та диспансеризації. Сама реабілітація – це динамічна система взаємозалежних медичних, психологічних і соціальних компонентів, під час реалізації яких спостерігається як відновлення та збереження здоров'я, так і більш повне відновлення і/або збереження особистості й соціального статусу хворого чи інваліда. У системі сучасної реабілітації розглядають такі складники, як медичний, фізичний, професійно-трудовий, соціально-економічний. Медичну реабілітацію розуміють як багатогранне поняття. Вона передбачає проведення різноспрямованих заходів щодо відновлення порушених функцій організму і працездатності хворих та інвалідів.

Тому важливим елементом медичної реабілітації визначають фізичну реабілітацію, оскільки

для відновлення порушених функцій організму використовуються лікувальні фізичні чинники. Фізична реабілітація – комплекс різноманітних фізичних методів і вправ, застосування яких спрямоване на відновлення фізичної працездатності хворих [13–15].

Усі способи фізичної реабілітації можна об'єднати в три групи: активні, пасивні та психорегульовальні. До активної групи зараховують усі форми ЛФК, елементи спорту та спортивної підготовки, кінезотерапію, працетерапію, ходіння, біг, роботу на тренажерах [16–17]; до пасивної – масаж, мануальну терапію, фізіотерапію, природні та преформовані фізичні фактори; до психорегульовальної – аутогенне тренування, м'язову релаксацію [18–20].

Як правило, незважаючи на велику кількість фізичних вправ і методів, основну мету реабілітації можна поділити на такі напрями: 1) покращення кровообігу уражених частин тіла чи органів; 2) зменшення больового синдрому; 3) відновлення функцій пошкоджених частин тіла чи органів; 4) підвищення функціональних можливостей суглобів; 5) відновлення функціональних і нейродинамічних відношень і порушених функцій; 6) відновлення соціальної адаптації та поліпшення навичок міжособистісної комунікації; 7) накопичення позитивних емоційних переживань, що сприяють ефективній реабілітації [21–22].

Різнманіття й унікальність природних ресурсів України, зокрема навколишнього середовища (рельєф, клімат, мінеральні води тощо). Ці природні цілющі фактори зумовлюють показання для санаторно-курортного лікування. Україна має низькогірські (до 1000 метрів над рівнем моря) і середньогірські (до 1600 метрів) курорти, які розташовані в Карпатах. Цінністю гірських курортів є вплив повітряного середовища зі зниженим парціальним тиском газів, які входять до складу повітря, а також кисню й вологості повітря. При цьому сонячна радіація збільшується. Під впливом цих кліматичних умов після адаптації збільшується кількість еритроцитів, гемоглобіну в крові що призводить до підвищення мінералізації й основного обігу психоемоційного стану пацієнтів. Найголовніше – це те, що всі ці природні умови забезпечують можливість реалізації гіпоксітерапії як одного з методів фізичної реабілітації [23–24].

В основі методу гіпоксітерапії лежить адаптація організму до дії гіпоксії. У результаті таких тренувань покращується обмін речовин, підвищується працездатність і стійкість організму до

негативних факторів зовнішнього середовища. Гіпоксичні тренування можна використовувати як для людей молодого та зрілого віку – включаючи спортсменів, моряків, альпіністів, так і людей похилого та старечого віку з різною патологією [25].

При використанні гіпоксітерапії в лікувальних цілях для кожного пацієнта підбирається окремий режим гіпоксичних тренувань. Спершу проводять гіпоксичну пробу для оцінювання переносимості організмом гіпоксії. Після аналізу пацієнтам призначають індивідуальну програму гіпоксичних тренувань.

Такі тренування набули поширення для профілактики та спортивної медицини, а саме для підвищення фізичної та розумової працездатності, стійкості до емоційних напружень. При профілактиці гострих респіраторних, інфекційних захворювань, а також при десинхронозу гіпоксітерапія допомагає запобігти ускладненням вагітності, захистити від іонізуючої радіації та різних шкідливих факторів навколишнього середовища. У спорті гіпоксичні тренування дадуть змогу підвищити свої рекорди. Крім того, допоможуть запобігти передчасному старінню [26].

Гіпоксітерапію використовують для лікування захворювання серцево-судинної системи, патології органів дихання, хронічних запальних захворювань різної етіології та локалізації, захворювань ендокринної системи, вторинних імунodefіцитних станів, алергічних та аутоімунних захворювань, порушень метаболізму організму, неврозів, неврозоподібних астеничних і депресивних станів, епілепсії, токсикозів II половини вагітності, субфертильних станів у чоловіків, виразкової хвороби шлунку та 12-палої кишки тощо [27–28].

Під час гіпоксичних тренувань відбувається тимчасове переміщення людини в умови середньо- та високогір'я, виконання нею фізичних вправ при вдиханні повітря зі зниженою (щодо нормальних значень кисню на рівні моря) концентрацією O_2 з метою преакліматизації до висоти, тренування фізичного витривалості й підвищення спортивних результатів, оздоровлення (у широкому значенні). Застосування методів адаптації до гіпоксії в комплексному лікуванні пацієнтів із конкретними нозологічними формами називається гіпоксітерапією [29–30].

Вирішення конкретних завдань застосування гіпоксичних впливів за різних умов і мети тренувань зумовили різноманіття підходів до їх організації (рис. 1). Аналізуючи ці підходи, розглянемо їх переваги й обмеження.

Перший із запропонованих підходів «жити високо – тренуватися високо» (ЖВТВ) – тривале/багатоденне перебування в умовах природної гіпобаричної гіпоксії (ГГ) (санаторії та тренувальні спортивні бази низько- й середньогір'я). Для досягнення ефекту необхідне перебування в цих умовах до 4 тижнів.

Ця методика збільшує аеробну продуктивність за рахунок збільшення кисневої ємності крові (загальна маси гемоглобіну), об'єму циркулюючої крові. Але такий підхід має й обмеження: необхідність переміщення в умови середньогір'я (при природній гіпоксії), дорога апаратура в разі моделювання ГГ у барокамерах, що потребує постійного інженерного обслуговування, розвиток ускладнень і побічних ефектів гіпобарії (баротравми вестибулярного апарату, підвищене газоутворення тощо) [31].

Другий підхід – «жити високо – тренуватися низько (на рівнині)» (ЖВТН). Суть цього підходу в тому, що в нічний час доби (до 12–14 год) людина перебуває в умовах ГГ, а вдень виконує фізичні тренування в умовах рівнини. За такого підходу підвищення витривалості відбувається внаслідок збільшення кисневої ємності крові, ОЦК та нівелювання негативного ефекту тривалого гіпоксичного впливу – зниження активності Na, K-АТФази скелетних м'язів, що, у свою чергу, супроводжу-

ється імунодепресією, зниженням м'язової маси та, як наслідок, потужності виконуваних навантажень. Тому в практику ввели використання штучного гіпоксичного впливу без застосування барокамер – нормобаричну гіпоксію (НГ), зокрема застосовуються гіпоксичні генератори в комплекті з гіпоксичними тентами, наметами або спеціально оснащеними кімнатами для створення гіпоксичного середовища (уміст O_2 – 12,5–14%) [32].

Третій напрям тренувань – це комбінація перших двох – «жити високо – тренуватися низько й високо» (ЖВТНВ) [33].

Четвертий режим тренувань «жити низько – тренуватися високо» (ЖНТВ) – періодичні тренування, коли фізичні вправи виконуються в гіпоксичних умовах. Цей спосіб включає кілька підходів поєднання навантаження та гіпоксичної стимуляції [34].

Активні тренування (дозовані фізичні навантаження) у гіпоксії (АГГ), що поєднують безперервні гіпоксичні експозиції (30–120 хв) із виконанням навантаження низької інтенсивності на тредмілі чи велоергометрі, ефективно застосовуються в кардіореабілітації [35]. Також доведена дія для зниження маси тіла й корекції ключових кардіометаболічних факторів ризику, інсулінорезистентності в пацієнтів із надмірною масою тіла, ожирінням, метаболічним синдромом [36].

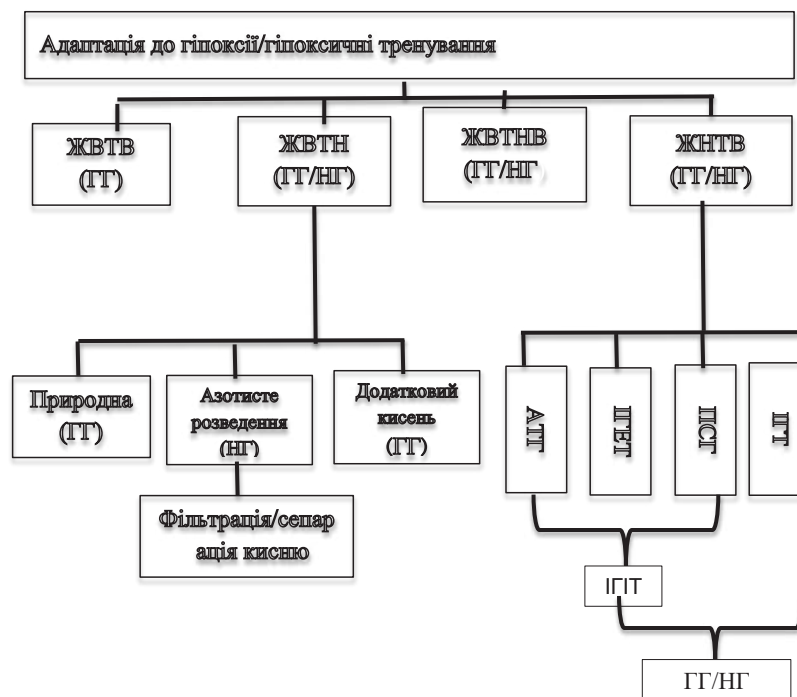


Рис. 1. Класифікація видів гіпоксичних впливів, що застосовуються у фізіології спорту, клінічній і профілактичній медицині

Другий тип тренувань – інтервальна гіпоксична експозиція під час тренувальній сесії (ІГЕТ). Більш інтенсивний, ніж АТГ, метод гіпоксичної експозиції, при цьому фізичне навантаження – помірної та високої інтенсивності (більше ніж 70% рівня максимальної потреби кисню) інтервалами, що чергуються, супроводжується диханням гіпоксичною газовою сумішшю. Тривалість кожного тренування – 30–40 хв, тренувального блоку – 2–6 тижнів. Цей тип тренування активно застосовується в професійному спорті та фітнес-індустрії для зниження маси тіла, а також підготовки до високогірних сходжень [37–38].

Інтервальна гіпоксична експозиція під час інтервального спортивного тренування (ІГІТ) є комбінацією перших двох підходів. При цьому підході виконується інтервальна подача гіпоксичної газової суміші (через маску) у момент виконання навантаження високої інтенсивності та зміна на нормоксичну газову суміш у момент виконання навантаження низької інтенсивності [39–40].

Окремо використовують повторні спринти за умов гіпоксії (ПСГ), їх виконання сприяє поліпшенню здатності до повторних прискорень та активно застосовується, як правило, у спорті у зв'язку з потребою у високих фізичних навантаженнях [41].

Дещо ізолювано від усіх попередніх знаходиться техніка адаптації до коротких інтервалів вираженої гіпоксії (11–12% O_2), що переривається диханням атмосферним повітрям, – метод пасивних інтервальних гіпоксичних тренувань (ІГТ). Установлено ефективність пасивних ІГТ у підвищенні толерантності до фізичних навантажень і якості життя пацієнтів із серцево-судинною, бронхолегеневою патологією, у реабілітації літніх пацієнтів із гіпертонічною хворобою, метаболічним синдромом. Також важливими в прикладному плані є результати оцінювання переносимості пацієнтами процедур ІГТ: побічні ефекти (задишка, прискорене серцебиття при проходженні перших процедур, запаморочення) спостерігалися в поодиноких пацієнтів, а при неве-

ликому підвищенні концентрації O_2 суб'єктивно неприємні відчуття й негативні симптоми зникали. При цьому гіпоксичні процедури не провокували ангінальні напади в пацієнтів з ішемічною хворобою серця після інфаркту міокарда, добре переносилися навіть літніми людьми (65–85 років) [42–44].

Зовсім новий підхід до підвищення ефективності ІГТ, який полягає в чергуванні при процедурах ІГТ коротких гіпоксичних експозицій і гіпероксичних інтервалів з подачею в ці періоди через маску газової суміші з умістом O_2 30–35% (замість дихання звичайним повітрям). Цей спосіб отримав назву інтервальних гіпоксично-гіпероксичних тренувань (ІГГТ). Відмічається більше оперативне відновлення фізичної працездатності, нормалізація вегетативного балансу, підвищення гіпоксичної толерантності порівняно з ІГТ [45].

Висновки. Установлено, що гіпоксітерапія має низку позитивних впливів на організм людини, сприяє активації процесів кровотворення і збільшує кількість червоних кров'яних клітин, що покращує постачання кисню до тканин та органів. Це особливо важливо в процесі відновлення після травм або хірургічного втручання. Гіпоксія активує механізми, які знижують запалення, що допомагає пришвидшити процес загоєння й відновлення після різних ушкоджень або захворювань особливо в м'язах і суглобах. За рахунок адаптації до умов зниженої концентрації кисню пацієнти підвищують свою фізичну витривалість, що є важливим аспектом у реабілітації після травм або операцій особливо для спортсменів. Гіпоксія стимулює обмін речовин і стимулює нервову систему.

Гіпоксітерапія має велику кількість різноманітних підходів до профілактики та фізичної реабілітації хворих. Згідно з оглядом літератури, найбільш практичним є спосіб пасивних інтервальних гіпоксичних тренувань та інтервальних гіпоксично-гіпероксичних тренувань, які в декілька разів ефективніші за інші способи лікування й поліпшення фізичного стану здоров'я людини.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Storz J.F., Cheviron Z.A. Physiological genomics of adaptation to high-altitude hypoxia. *Annual Review of Animal Biosciences*, 2021. Vol. 9 (1). P. 149–171.
2. Durand F., Raberin A. Exercise-induced hypoxemia in endurance athletes: consequences for altitude exposure. *Frontiers in Sports and Active Living*, 2021. Vol. 3. 663674.
3. Soo J., Girard O., Ihsan M., Fairchild T. The use of the SpO2 to FiO2 ratio to individualize the hypoxic dose in sport science, exercise, and health settings. *Frontiers in Physiology*, 2020. Vol. 11. 570472.
4. Haryanto A.I., Kadir S., Suardika I. K., Muktiani N. R. Analysis of Maximal Volume of Oxygen for Gorontalo Contingent Martial Arts Athletes. *ACTIVE: Journal of Physical Education, Sport, Health and Recreatio*. 2024. Vol. 13 (2).

5. Yang L., Dai M., Cao Q., Ding S., Zhao Z., Cao X., ... Fu F. Real-time monitoring hypoxia at high altitudes using electrical bioimpedance technique: an animal experiment. *Journal of Applied Physiology*. 2021. Vol. 130 (4). P. 952–963.
6. Wang F., Zhang H., Xu T., Hu Y., Jiang Y. Acute exposure to simulated high-altitude hypoxia alters gut microbiota in mice. *Archives of Microbiology*. 2022. Vol. 204 (7). P. 412.
7. Storz J.F. High-altitude adaptation: mechanistic insights from integrated genomics and physiology. *Molecular biology and evolution*. 2021. Vol. 38 (7). P. 2677–2691.
8. Baloglu E., Nonnenmacher G., Seleninova A., Berg L., Velineni K., Ermis-Kaya E., Mairbäurl H. The role of hypoxia-induced modulation of alveolar epithelial Na⁺-transport in hypoxemia at high altitude. *Pulmonary Circulation*. 2020. Vol. 10 (1_suppl). P. 50–58.
9. Beall C.M., Strohl K.P. Adaptations to high-altitude hypoxia. In Oxford Research Encyclopedia of Anthropology. 2021.
10. Bagińska M., Kałuża A., Tota Ł., Piotrowska A., Maciejczyk M., Mucha D., ... Pałka T. The Impact of Intermittent Hypoxic Training on Aerobic Capacity and Biometric-Structural Indicators among Obese Women-A Pilot Study. *Journal of Clinical Medicine*. 2024. Vol. 13 (2). P. 380.
11. Ramchandani R., Florica I.T., Zhou Z., Alemi A., Baranchuk A. Review of Athletic Guidelines for High-Altitude Training and Acclimatization. *High Altitude Medicine & Biology*. 2024. Vol. 25 (2). P. 113–121.
12. Sharma P., Mohanty S., Ahmad Y. A study of survival strategies for improving acclimatization of lowlanders at high-altitude. *Heliyon*. 2023. Vol. 9 (4).
13. Woodbridge H.R., Norton C., Jones M., Brett S.J., Alexander C.M., Gordon A.C. Clinician and patient perspectives on the barriers and facilitators to physical rehabilitation in intensive care: a qualitative interview study. *BMJ open*. 2023. Vol. 13 (11). e073061.
14. Zlotnik S., Weiss P.L., Raban D.R., Houldin-Sade A. Use of gamification for adult physical rehabilitation in occupational therapy; a novel concept?. *Hong Kong Journal of Occupational Therapy*. 2023. Vol. 36 (2). P. 51–56.
15. Rahmati M., Shamsi M.M., Woo W., Koyanagi A., Lee S. W., Yon D. K., ... Smith L. Effects of physical rehabilitation interventions in COVID-19 patients following discharge from hospital: A systematic review. *Journal of integrative medicine*. 2023. Vol. 21 (2). P. 149–158.
16. Karloh M., Barbosa G.B., Matias T.S. The unifying theory of physical activity: a promising holistic perspective for physiotherapy and rehabilitation. *Physiotherapy*. 2023. Vol. 120. P. 36–37.
17. Walsh C.M., Gull K., Dooley D. Motor rehabilitation as a therapeutic tool for spinal cord injury: New perspectives in immunomodulation. *Cytokine & growth factor reviews*. 2023. Vol. 69. P. 80–89.
18. Li L., Han J., Li X., Guo B., Wang X. Customized Trajectory Optimization and Compliant Tracking Control for Passive Upper Limb Rehabilitation. *Sensors*. 2023. Vol. 23 (15). P. 6953.
19. Abu-Dakka F.J., Valera A., Escalera J.A., Abderrahim M., Page A., Mata V. Passive exercise adaptation for ankle rehabilitation based on learning control framework. *Sensors*. 2020. Vol. 20 (21). P. 6215.
20. Lee K.E., Choi M., Jeoung B. Effectiveness of rehabilitation exercise in improving physical function of stroke patients: a systematic review. *International journal of environmental research and public health*. 2022. Vol. 19 (19). P. 12739.
21. Gamonales J.M., Rojas-Valverde D., Vásquez J., Martínez-Guardado I., Azofeifa-Mora C., Sánchez-Ureña B., Ibáñez S.J. An update to a comprehensive assessment of the methods and effectiveness of resistance training in normobaric hypoxia for the development of strength and muscular hypertrophy. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13 (2). P. 1078.
22. de Carvalho C.D., Putti G.M., Foresti Y.F., Ribeiro F.A., Andreossi J.C., de Campos G.F., Papoti M. Recovery in normobaric hypoxia as an additional stimulus for high-intensity intermittent training. *Science & Sports*. 2023. Vol. 38 (2). P. 189–196.
23. Yu Q., Kong Z., Zou L., Chapman R., Shi Q., Nie J. Comparative efficacy of various hypoxic training paradigms on maximal oxygen consumption: A systematic review and network meta-analysis. *Journal of Exercise Science & Fitness*. 2023.
24. He Z., Qiang L., Liu Y., Gao W., Feng T., Li Y., ... Girard O. Effect of Hypoxia Conditioning on Body Composition in Middle-Aged and Older Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine-Open*. 2023. Vol. 9 (1). P. 89.
25. Liang Y., Ruan W., Jiang Y., Smalling R., Yuan X., Eltzschig H.K. Interplay of hypoxia-inducible factors and oxygen therapy in cardiovascular medicine. *Nature Reviews Cardiology*. 2023. Vol. 20 (11). P. 723–737.
26. Uzun A.B., Iliescu M.G., Stanciu L.E., Ionescu E.V., Ungur R.A., Ciortea V.M., ... Tofolean D.E. Effectiveness of intermittent hypoxia-hyperoxia therapy in different pathologies with possible metabolic implications. *Metabolites*. 2023. Vol. 13 (2). P. 181.
27. Scott B.R. Hypoxic training for strength enhancement. In Hypoxia Conditioning in Health, *Exercise and Sport*. 2024. P. 233–246.
28. Merellano-Navarro E., Camacho-Cardenosa M., Costa G.P., Wiggers E., Marcolino Putti G., Evandro Nogueira J., ... Trapé Á.A. Effects of different protocols of moderate-intensity intermittent hypoxic training on mental health and quality of life in brazilian adults recovered from COVID-19: The AEROBICOVID double-blind randomized controlled study. *In Healthcare*. 2023. Vol. 11. № 23.P. 3076. MDPI.
29. Hohenauer E., Freitag L., Costello J. T., Williams T. B., Küng T., Taube W., ... Clijsen R. The effects of normobaric and hypobaric hypoxia on cognitive performance and physiological responses: A crossover study. *PLoS One*. 2022. Vol. 17 (11). e0277364.
30. Falla M., Hüfner K., Falk M., Weiss E.M., Vögele A., Jan van Veelen M., ... Strapazzon G. Simulated acute hypobaric hypoxia effects on cognition in helicopter emergency medical service personnel-a randomized, controlled, single-blind, crossover trial. *Human factors*. 2024. Vol. 66 (2). P. 404–423.

31. Lu Y., Zhou X., Cheng J., Ma Q. Early intensified rehabilitation training with hyperbaric oxygen therapy improves functional disorders and prognosis of patients with traumatic brain injury. *Advances in Wound Care*. 2021. Vol. 10 (12). P. 663–670.
32. Ma C., Xu H., Yan M., Huang J., Yan W., Lan K., ... Zhang Z. Longitudinal changes and recovery in heart rate variability of young healthy subjects when exposure to a hypobaric hypoxic environment. *Frontiers in Physiology*. 2022. Vol. 12. 688921.
33. Mallet R.T., Mayer K., Xi L. Intermittent hypoxia Effective systemic modality for cardiac rehabilitation. *In Hypoxia Conditioning in Health, Exercise and Sport*. 2024. P. 155–165.
34. Muangritdech N., Hamlin M. J., Sawanyawisuth K., Prajumwongs P., Saengjan W., Wonnabussapawich P., ... Manimmanakorn A. Hypoxic training improves blood pressure, nitric oxide and hypoxia-inducible factor-1 alpha in hypertensive patients. *European journal of applied physiology*. 2010. Vol. 120. P. 1815–1826.
35. Norberto M.S., Torini J.V.G., Firmino M.S., Papoti M. Validation of Air Storage System for Hypoxia Exposure During Exercise. *High Altitude Medicine & Biology*. 2024.
36. Ghaleb A.M., Ramadan M.Z., Badwelan A., Mansour L., Al-Tamimi J., Aljaloud K.S. Determining the time needed for workers to acclimatize to hypoxia. *International Journal of Biometeorology*. 2020. Vol. 64. P. 1995–2005.
37. Peltonen J.E., Leppävuori A., Lehtonen E., Mikkonen R. S., Kettunen O., Nummela A., ... Linnamo V. Combined intermittent hypoxic exposure at rest and continuous hypoxic training can maintain elevated hemoglobin mass after a hypoxic camp. *Journal of Applied Physiology*. 2024. Vol. 137 (2). P. 409–420.
38. Behrendt T., Bielitzki R., Behrens M., Herold F., Schega L. Effects of intermittent hypoxia-hyperoxia on performance and health-related outcomes in humans: A systematic review. *Sports medicine-open*. 2022. Vol. 8 (1). P. 70.
39. Camacho-Cardenosa A., Camacho-Cardenosa M., Martínez-Guardado I., Brazo-Sayavera J., Timon R., Olcina G. Effects of repeated-sprint training in hypoxia on physical performance of team sports players. *Revista Brasileira de Medicina do Esporte*. 2020. Vol. 26 (2). P. 153–157.
40. Tobin B., Costalat G., Renshaw G.M. Intermittent not continuous hypoxia provoked haematological adaptations in healthy seniors: hypoxic pattern may hold the key. *European journal of applied physiology*. 2020. Vol. 120 (3). P. 707–718.
41. Behrendt T., Bielitzki R., Behrens M., Herold F., Schega L. Effects of intermittent hypoxia-hyperoxia on performance and health-related outcomes in humans: A systematic review. *Sports medicine-open*. 2022. Vol. 8 (1). P. 70.
42. Takei N., Kakinoki K., Girard O., Hatta H. Short-Term repeated wingate training in hypoxia and normoxia in sprinters. *Frontiers in Sports and Active Living*. 2020. Vol. 2. P. 43.
43. Faulhaber M., Schneider S., Rausch L.K., Dünnwald T., Menz V., Gatterer H., ... Schobersberger W. Repeated Short-Term Bouts of Hyperoxia Improve Aerobic Performance in Acute Hypoxia. *The Journal of Strength & Conditioning Research*. 2023. Vol. 37 (10). P. 2016–2022.
44. Behrendt T., Bielitzki R., Behrens M., Herold F., Schega L. Effects of intermittent hypoxia-hyperoxia on performance and health-related outcomes in humans: A systematic review. *Sports medicine-open*. 2022. Vol. 8 (1). P. 70.
45. Hencz A.J., Magony A., Thomas C., Kovacs K., Szilagy G., Pal J., Sik A. Short-term hyperoxia-induced functional and morphological changes in rat hippocampus. *Frontiers in Cellular Neuroscience*. 2024. Vol. 18. P. 1376577.

REFERENCES:

1. Storz, J.F., & Cheviron, Z.A. (2021). Physiological genomics of adaptation to high-altitude hypoxia. *Annual Review of Animal Biosciences*, 9(1), 149–171 [in English].
2. Durand, F., & Raberin, A. (2021). Exercise-induced hypoxemia in endurance athletes: consequences for altitude exposure. *Frontiers in Sports and Active Living*, 3, 663674 [in English].
3. Soo, J., Girard, O., Ihsan, M., & Fairchild, T. (2020). The use of the SpO2 to FiO2 ratio to individualize the hypoxic dose in sport science, exercise, and health settings. *Frontiers in Physiology*, 11, 570472 [in English].
4. Haryanto, A.I., Kadir, S., Suardika, I.K., & Mukhtiani, N.R. (2024). Analysis of Maximal Volume of Oxygen for Gorontalo Contingent Martial Arts Athletes. *ACTIVE: Journal of Physical Education, Sport, Health and Recreation*, 13(2) [in English].
5. Yang, L., Dai, M., Cao, Q., Ding, S., Zhao, Z., Cao, X., ... & Fu, F. (2021). Real-time monitoring hypoxia at high altitudes using electrical bioimpedance technique: an animal experiment. *Journal of Applied Physiology*, 130(4), 952–963 [in English].
6. Wang, F., Zhang, H., Xu, T., Hu, Y., & Jiang, Y. (2022). Acute exposure to simulated high-altitude hypoxia alters gut microbiota in mice. *Archives of Microbiology*, 204(7), 412 [in English].
7. Storz, J.F. (2021). High-altitude adaptation: mechanistic insights from integrated genomics and physiology. *Molecular biology and evolution*, 38(7), 2677–2691 [in English].
8. Baloglu, E., Nonnenmacher, G., Seleninova, A., Berg, L., Velineni, K., Ermis-Kaya, E., & Mairbäurl, H. (2020). The role of hypoxia-induced modulation of alveolar epithelial Na⁺-transport in hypoxemia at high altitude. *Pulmonary Circulation*, 10(1 suppl), 50–58 [in English].
9. Beall, C.M., & Strohl, K.P. (2021). Adaptations to high-altitude hypoxia. In *Oxford Research Encyclopedia of Anthropology* [in English].
10. Bagińska, M., Kałuża, A., Tota, Ł., Piotrowska, A., Maciejczyk, M., Mucha, D., ... & Pałka, T. (2024). The Impact of Intermittent Hypoxic Training on Aerobic Capacity and Biometric-Structural Indicators among Obese Women—A Pilot Study. *Journal of Clinical Medicine*, 13(2), 380 [in English].

11. Ramchandani, R., Florica, I.T., Zhou, Z., Alemi, A., & Baranchuk, A. (2024). Review of Athletic Guidelines for High-Altitude Training and Acclimatization. *High Altitude Medicine & Biology*, 25(2), 113–121 [in English].
12. Sharma, P., Mohanty, S., & Ahmad, Y. (2023). A study of survival strategies for improving acclimatization of lowlanders at high-altitude. *Heliyon*, 9(4) [in English].
13. Woodbridge, H.R., Norton, C., Jones, M., Brett, S.J., Alexander, C.M., & Gordon, A.C. (2023). Clinician and patient perspectives on the barriers and facilitators to physical rehabilitation in intensive care: a qualitative interview study. *BMJ open*, 13(11), e073061 [in English].
14. Zlotnik, S., Weiss, P.L., Raban, D.R., & Houldin-Sade, A. (2023). Use of gamification for adult physical rehabilitation in occupational therapy; a novel concept?. *Hong Kong Journal of Occupational Therapy*, 36(2), 51–56 [in English].
15. Rahmati, M., Shamsi, M.M., Woo, W., Koyanagi, A., Lee, S.W., Yon, D.K., ... & Smith, L. (2023). Effects of physical rehabilitation interventions in COVID-19 patients following discharge from hospital: A systematic review. *Journal of integrative medicine*, 21(2), 149–158 [in English].
16. Karloh, M., Barbosa, G.B., & Matias, T.S. (2023). The unifying theory of physical activity: a promising holistic perspective for physiotherapy and rehabilitation. *Physiotherapy*, 120, 36–37 [in English].
17. Walsh, C.M., Gull, K., & Dooley, D. (2023). Motor rehabilitation as a therapeutic tool for spinal cord injury: New perspectives in immunomodulation. *Cytokine & growth factor reviews*, 69, 80–89 [in English].
18. Li, L., Han, J., Li, X., Guo, B., & Wang, X. (2023). Customized Trajectory Optimization and Compliant Tracking Control for Passive Upper Limb Rehabilitation. *Sensors*, 23(15), 6953 [in English].
19. Abu-Dakka, F.J., Valera, A., Escalera, J.A., Abderrahim, M., Page, A., & Mata, V. (2020). Passive exercise adaptation for ankle rehabilitation based on learning control framework. *Sensors*, 20(21), 6215 [in English].
20. Lee, K.E., Choi, M., & Jeoung, B. (2022). Effectiveness of rehabilitation exercise in improving physical function of stroke patients: a systematic review. *International journal of environmental research and public health*, 19(19), 12739 [in English].
21. Gamonales, J.M., Rojas-Valverde, D., Vásquez, J., Martínez-Guardado, I., Azofeifa-Mora, C., Sánchez-Ureña, B., & Ibáñez, S.J. (2023). An update to a comprehensive assessment of the methods and effectiveness of resistance training in normobaric hypoxia for the development of strength and muscular hypertrophy. *Applied Sciences*, 13(2), 1078 [in English].
22. de Carvalho, C.D., Putti, G.M., Foresti, Y.F., Ribeiro, F.A., Andreossi, J.C., de Campos, G.F., & Papoti, M. (2023). Recovery in normobaric hypoxia as an additional stimulus for high-intensity intermittent training. *Science & Sports*, 38(2), 189–196 [in English].
23. Yu, Q., Kong, Z., Zou, L., Chapman, R., Shi, Q., & Nie, J. (2023). Comparative efficacy of various hypoxic training paradigms on maximal oxygen consumption: A systematic review and network meta-analysis. *Journal of Exercise Science & Fitness* [in English].
24. He, Z., Qiang, L., Liu, Y., Gao, W., Feng, T., Li, Y., ... & Girard, O. (2023). Effect of Hypoxia Conditioning on Body Composition in Middle-Aged and Older Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine-Open*, 9(1), 89 [in English].
25. Liang, Y., Ruan, W., Jiang, Y., Smalling, R., Yuan, X., & Eltzschig, H. K. (2023). Interplay of hypoxia-inducible factors and oxygen therapy in cardiovascular medicine. *Nature Reviews Cardiology*, 20(11), 723–737 [in English].
26. Uzun, A.B., Iliescu, M.G., Stanciu, L.E., Ionescu, E.V., Ungur, R.A., Ciorrea, V.M., ... & Tofolean, D. E. (2023). Effectiveness of intermittent hypoxia-hyperoxia therapy in different pathologies with possible metabolic implications. *Metabolites*, 13(2), 181 [in English].
27. Scott, B.R. (2024). Hypoxic training for strength enhancement. In *Hypoxia Conditioning in Health, Exercise and Sport* (pp. 233–246). Routledge [in English].
28. Merellano-Navarro, E., Camacho-Cardenosa, M., Costa, G.P., Wiggers, E., Marcolino Putti, G., Evandro Nogueira, J., ... & Trapé, Á.A. (2023, November). Effects of different protocols of moderate-intensity intermittent hypoxic training on mental health and quality of life in brazilian adults recovered from COVID-19: The AEROBICOVID double-blind randomized controlled study. In *Healthcare* (Vol. 11, No. 23, p. 3076). MDPI [in English].
29. Hohenauer, E., Freitag, L., Costello, J.T., Williams, T.B., Küng, T., Taube, W., ... & Clijsen, R. (2022). The effects of normobaric and hypobaric hypoxia on cognitive performance and physiological responses: A crossover study. *PLoS One*, 17(11), e0277364 [in English].
30. Falla, M., Hüfner, K., Falk, M., Weiss, E.M., Vögele, A., Jan van Veelen, M., ... & Strapazzon, G. (2024). Simulated acute hypobaric hypoxia effects on cognition in helicopter emergency medical service personnel—a randomized, controlled, single-blind, crossover trial. *Human factors*, 66(2), 404–423 [in English].
31. Lu, Y., Zhou, X., Cheng, J., & Ma, Q. (2021). Early intensified rehabilitation training with hyperbaric oxygen therapy improves functional disorders and prognosis of patients with traumatic brain injury. *Advances in Wound Care*, 10(12), 663–670 [in English].
32. Ma, C., Xu, H., Yan, M., Huang, J., Yan, W., Lan, K., ... & Zhang, Z. (2022). Longitudinal changes and recovery in heart rate variability of young healthy subjects when exposure to a hypobaric hypoxic environment. *Frontiers in Physiology*, 12, 688921 [in English].
33. Mallet, R.T., Mayer, K., & Xi, L. (2024). Intermittent hypoxia Effective systemic modality for cardiac rehabilitation. In *Hypoxia Conditioning in Health, Exercise and Sport* (pp. 155–165) [in English].
34. Muangritdech, N., Hamlin, M.J., Sawanyawisuth, K., Prajumwongs, P., Saengjan, W., Wonnabussapawich, P., ... & Manimmanakorn, A. (2020). Hypoxic training improves blood pressure, nitric oxide and hypoxia-inducible factor-1 alpha in hypertensive patients. *European journal of applied physiology*, 120, 1815–1826 [in English].

-
35. Norberto, M.S., Torini, J.V.G., Firmino, M.S., & Papoti, M. (2024). Validation of Air Storage System for Hypoxia Exposure During Exercise. *High Altitude Medicine & Biology* [in English].
36. Ghaleb, A.M., Ramadan, M.Z., Badwelan, A., Mansour, L., Al-Tamimi, J., & Aljaloud, K.S. (2020). Determining the time needed for workers to acclimatize to hypoxia. *International Journal of Biometeorology*, 64, 1995–2005 [in English].
37. Peltonen, J.E., Leppävuori, A., Lehtonen, E., Mikkonen, R.S., Kettunen, O., Nummela, A., ... & Linnamo, V. (2024). Combined intermittent hypoxic exposure at rest and continuous hypoxic training can maintain elevated hemoglobin mass after a hypoxic camp. *Journal of Applied Physiology*, 137(2), 409–420 [in English].
38. Behrendt, T., Bielitzki, R., Behrens, M., Herold, F., & Schega, L. (2022). Effects of intermittent hypoxia–hyperoxia on performance-and health-related outcomes in humans: A systematic review. *Sports medicine-open*, 8(1), 70 [in English].
39. Camacho-Cardenosa, A., Camacho-Cardenosa, M., Martínez-Guardado, I., Brazo-Sayavera, J., Timon, R., & Olcina, G. (2020). Effects of repeated-sprint training in hypoxia on physical performance of team sports players. *Revista Brasileira de Medicina do Esporte*, 26(2), 153–157 [in English].
40. Tobin, B., Costalat, G., & Renshaw, G.M. (2020). Intermittent not continuous hypoxia provoked haematological adaptations in healthy seniors: hypoxic pattern may hold the key. *European journal of applied physiology*, 120(3), 707–718 [in English].
41. Behrendt, T., Bielitzki, R., Behrens, M., Herold, F., & Schega, L. (2022). Effects of intermittent hypoxia–hyperoxia on performance-and health-related outcomes in humans: A systematic review. *Sports medicine-open*, 8(1), 70 [in English].
42. Takei, N., Kakinoki, K., Girard, O., & Hatta, H. (2020). Short-Term repeated wingate training in hypoxia and normoxia in sprinters. *Frontiers in Sports and Active Living*, 2, 43 [in English].
43. Faulhaber, M., Schneider, S., Rausch, L. K., Dünwald, T., Menz, V., Gatterer, H., ... & Schobersberger, W. (2023). Repeated Short-Term Bouts of Hyperoxia Improve Aerobic Performance in Acute Hypoxia. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 37(10), 2016–2022 [in English].
44. Behrendt, T., Bielitzki, R., Behrens, M., Herold, F., & Schega, L. (2022). Effects of intermittent hypoxia–hyperoxia on performance-and health-related outcomes in humans: A systematic review. *Sports medicine-open*, 8(1), 70 [in English].
45. Hencz, A.J., Magony, A., Thomas, C., Kovacs, K., Szilagyi, G., Pal, J., & Sik, A. (2024). Short-term hyperoxia-induced functional and morphological changes in rat hippocampus. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 18, 1376577 [in English].
-