

УДК 796.06:577.17

DOI <https://doi.org/10.24195/olympicus/2025-3.17>**Осипенко Ганна Антонівна**

кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри медичної біології та спортивної дієтології
Національний університет фізичного виховання і спорту
ORCID ID: 0000-0005-0024-0680

Вдовенко Наталія Володимирівна

кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник,
завідувачка лабораторії ергогенних чинників у спорті
Державний науково-дослідний інститут фізичної культури і спорту
ORCID ID: 0000-0002-3097-5920

Хмельницька Юлія Костянтинівна

кандидат наук з фізичного виховання і спорту, доцент,
доцент кафедри медичної біології та спортивної дієтології
Національний університет фізичного виховання і спорту
ORCID ID: 0000-0002-0231-1879

Гусарова Анна Михайлівна

кандидат наук з фізичного виховання та спорту, старший дослідник,
старший науковий співробітник лабораторії ергогенних чинників у спорті
Державний науково-дослідний інститут фізичної культури і спорту
ORCID ID: 0000-0002-9950-3980

Россоха Галина Володимирівна

молодший науковий співробітник лабораторії ергогенних чинників у спорті
Державний науково-дослідний інститут фізичної культури і спорту
ORCID ID: 0000-0003-2173-5068

РОЛЬ ГОРМОНІВ У МЕТАБОЛІЧНІЙ АДАПТАЦІЇ ДО ФІЗИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Актуальність проблеми. Гормональна, або ендокринна, система відіграє важливу роль у підтримці нормального функціонування різних систем організму, а також у перебудові метаболізму під час розвитку термінової і довготривалої адаптації організму до фізичних навантажень, у процесах відновлення після дії стрес-факторів тощо. Вона регулює ці процеси за допомогою спеціальних біологічно активних речовин – гормонів. Від нормального функціонування ендокринної регуляторної системи залежить фізіологічний та психологічний стан організму людини. Порушення гормонального балансу, викликане надмірним або недостатнім фізичним навантаженням, може призводити до розвитку функціонального виснаження ендокринної системи, зниження рівня анаболічних гормонів, розвитку хронічного стомлення та зниження працездатності. Гормональна система є ключовим елементом у механізмах біохімічної адаптації організму спортсмена до фізичних навантажень. Розуміння механізмів дії гормонів, їх взаємозв'язку з ферментативними системами, процесами біосинтезу білка та проникності клітинних мембран відкриває можливості для оптимізації тренувального процесу, профілактики перетренованості та досягнення високих спортивних результатів. **Мета.** Узагальнення сучасних даних щодо ролі гормонів у метаболічній адаптації організму до фізичних

навантажень. **Методи:** теоретичний аналіз та узагальнення даних сучасної наукової літератури і наукових публікацій у базах даних PubMed, Scopus, Web of Science та Google Scholar. **Результати дослідження.** Гормональна регуляція відіграє провідну роль у метаболічній адаптації до фізичних навантажень, забезпечуючи підтримання гомеостазу, мобілізацію енергетичних субстратів і формування тривалих адаптаційних змін. Гормони діють комплексно, узгоджено впливаючи на метаболізм (вуглеводний, ліпідний і білковий обміни). Кожна група гормонів виконує специфічні функції у процесі регуляції метаболізму під час та після фізичних навантажень. Їх взаємодія визначає ефективність енергозабезпечення м'язової діяльності та відновлення після навантаження. Ключовим механізмом дії гормонів є активація внутрішньоклітинних сигнальних шляхів, що забезпечують швидкі та довготривалі відповіді тканин. Порушення гормональної регуляції можуть свідчити про перевантаження, перетренованість або недостатнє відновлення. Саме тому моніторинг гормонального статусу є важливим інструментом у практиці спорту.

Ключові слова: гормональна регуляція, метаболізм, фізичні навантаження, м'язова діяльність, спортсмен.

Вступ. Організм людини є складною системою, яка здатна до саморегуляції, самовідновлення й адаптації під час змін зовнішнього середовища. Одним із потужних адаптаційних чинників для організму людини є фізичне навантаження, що викликає складні перебудови на клітинному, тканинному та системному рівнях [10; 21]. Ці процеси зумовлюють необхідність у клітинах підтримувати відносну постійність внутрішнього середовища або гомеостаз. Це, передусім, забезпечується змінами процесів обміну речовин та енергії, що зумовлюється дією регуляторних систем. Регуляція процесів внутрішньоклітинного метаболізму забезпечується взаємопов'язаною дією трьох регуляторних систем: автономною (на рівні діяльності ферментів), нервовою та гормональною.

Гормональна, або ендокринна, система відіграє важливу роль у підтримці нормального функціонування різних систем організму, а також у перебудові метаболізму під час розвитку термінової і довготривалої адаптації організму до фізичних навантажень, у процесах відновлення після дії стресу тощо [3; 5]. Вона регулює ці процеси за допомогою спеціальних біологічно активних речовин – гормонів. Від нормального функціонування ендокринної регуляторної системи залежить фізіологічний та психологічний стан організму людини [9; 15; 19].

Особливу роль у процесах регуляції метаболізму відіграють сигнальні шляхи гормональної дії, яким в останній час надається велике теоретичне і практичне значення [16; 21]. Гормони окремих ендокринних залоз (гіпоталамусу, гіпофізу, епіфізу, наднирників, щитоподібної, паращитоподібної, підшлункової та статевих залоз) забезпечують регуляцію різних процесів метаболізму, впливаючи на активність ферментів, процеси біосинтезу білка та проникнення речовин через клітинні мембрани [6; 21; 28]. Під час виконання м'язової роботи різного характеру задіяно різні сигнальні шляхи регуляції метаболізму, що призводять до гіпертрофії м'язів (під час силових вправ) або до збільшення кількості ферментів біологічного окиснення поживних речовин та мітохондрій (під час тренувань на витривалість) [21; 24; 32; 37].

Систематичні фізичні навантаження викликають активацію гормональної системи, а саме: зростає швидкість обміну гормонів, а також чутливість рецепторів до дії гормонів, зокрема адреналіну, що сприяє більш ефективній регуляції біоенергетичних процесів [8; 16]. Активація процесів синтезу та розпаду гормонів призводить до змін швидкості та спрямованості метаболічних процесів, що впливає на стан здоров'я та працездатність людини [27; 29].

Порушення гормонального фону в організмі у результаті надмірних або недостатніх фізичних навантажень може призводити до розвитку функціонального виснаження ендокринної системи, зниження рівня анаболічних гормонів, розвитку хронічного стомлення та зниження працездатності [35; 37; 38].

Таким чином, гормональна регуляторна система є ключовим елементом у механізмах біохімічних адаптації організму спортсмена до фізичних навантажень. Розуміння закономірностей зміни рівня гормонів, їхньої дії на ферментні системи, процеси біосинтезу та проникності клітинних мембран під час адаптації організму до фізичних навантажень відкриває можливості

для оптимізації тренувального процесу, профілактики перетренованості, прискорення процесів відновлення та досягнення високих спортивних результатів.

Мета та завдання. Узагальнення сучасних літературних даних щодо ролі гормонів у метаболічній адаптації організму до фізичних навантажень.

Дослідження проведено в межах наукових тем «Дослідження метаболічних зрушень та їх корекція за умов інтенсивних фізичних навантажень у кваліфікованих спортсменів пріоритетних видів спорту» (державний реєстраційний номер 0125U001057), «Наукове обґрунтування системи оцінки резервних та технічних можливостей спортсменів в олімпійському циклі підготовки» (державний реєстраційний номер 0125U001056) та «Вплив ендогенних та екзогенних факторів на перебіг адаптаційних реакцій організму до фізичних навантажень різної інтенсивності» (державний реєстраційний номер 012U108187).

Методи дослідження. Теоретичний аналіз та узагальнення даних сучасної наукової літератури і наукових публікацій у базах даних PubMed, Scopus, Web of Science та Google Scholar.

Результати дослідження. Гормони, що синтезуються в ендокринних залозах та за певних умов вивільнюються у кров, лімфу чи міжклітинну рідину, доставляються до різних клітин-мішеней, де регулюють процеси обміну та транспорту речовин, а також фізіологічні функції систем організму. Самі гормони не беруть участі в метаболічних реакціях, а є їх специфічними регуляторами, причому їхня регуляторна дія забезпечується різними складними механізмами. Гормони проявляють регуляторну дію лише в тих клітинах, які мають рецептори до певного гормону та можуть бути розташовані як на поверхні плазматичних мембран, так і у цитоплазмі чи ядрі клітин [4; 29; 33].

Гормони, які взаємодіють із рецепторами на поверхні плазматичної мембрани, після виконання регуляторної дії разом із рецептором переміщуються (занурюються) всередину клітини за механізмом ендоцитозу, де підлягають деградації, а рецептор або повертається на клітинну мембрану, або розщеплюється. Рецептор за період функціонування може здійснювати від 50 до 150 таких «човникових» циклів. Рецептори гормонів, що проникають усередину клітин, розташовані в цитоплазмі та, можливо, у ядрі [4; 29]. Так, наприклад, гормон стероїдної природи тестостерон проникає у клітину, де зв'язується з андрогеновим рецептором. Тестостерон усередині клітин може перетворюватися на більш активну форму – дигідротестостерон, який утворює з рецептором у 3–10 разів стабільніший комплекс, ніж тестостерон. Утворений гормон-рецепторний комплекс складним шляхом активується та переміщується в ядро, де безпосередньо взаємодіє з молекулою ДНК і регулює процес транскрипції певних генів. Є наукові дані про те, що андрогеновий рецептор локалізується і в ядрі [2; 29].

Гормональна регуляція процесів метаболізму залежить від будови гормону, його концентрації, кількості та типу рецепторів і клітин-мішеней, швидкості синтезу та розпаду гормонів і рецепторів. Тому за будь-якого порушення синтезу чи розпаду гормонів, зміни структури чи функцій рецепторів, а також внутрішньоклітинних передавачів будуть змінюватися синтез та діяльність ферментів і, відповідно, може порушуватися метаболізм та функції організму [17; 21; 27]. За вдосконалення цих процесів проявляється високий ступінь адаптації організму до різних чинників.

Нині виявлено близько 100 гормонів і нейромедіаторів, що розрізняються за місцем їх синтезу, хімічною будовою та механізмом регуляторної дії. За цими трьома чинниками найчастіше класифікуються гормони. Під час вивчення біохімії гормонів та розуміння механізму їхньої дії найбільш зручною є класифікація гормонів за хімічною будовою, згідно з якою, як уже було сказано, виділяються нестероїдні, або водорозчинні, та стероїдні, або жиророзчинні, класи гормонів, що легко проникають через мембрану клітини [18; 29].

У стані відносного спокою залози внутрішньої секреції працюють із низькою частотою секреції гормонів та підтримують фізіологічний рівень концентрації гормонів у крові на досить низькому рівні. Під впливом різних чинників внутрішнього та зовнішнього середовища (емоційного або больового подразнення, гіпоксії, фізичного навантаження тощо) секреція гормонів у кров збільшується для того, щоб зберегти відносну постійність внутрішнього середовища в усіх клітинах організму. Біосинтетична функція ендокринних залоз та їх секреція у кров

регулюється двояко: з одного боку, впливає нервова система, з іншого – концентрація у крові гормонів або речовин-метаболітів (глюкоза, жирні кислоти), що називається зворотним негативним чи позитивним зв'язком [13; 20].

Регуляція біосинтезу та секреції окремих гормонів у кров відбувається за участю ЦНС. Нервові імпульси із ЦНС потрапляють у гіпоталамус – координаційний центр ендокринної системи. У гіпоталамусі синтезуються спеціальні речовини, що називаються рилізінг-факторами, які потрапляють до гіпофізу і регулюють його функцію. Одні з них (ліберіни) підсилюють, а інші (статини) – гальмують синтез відповідних гормонів у гіпофізі. Гіпофіз виділяє (секретує) низку своїх гормонів у кров. Із током крові гормони гіпофізу потрапляють до тканин-мішеней, якими є периферичні ендокринні залози, і регулюють їхню функцію.

Периферичні залози викидають у кров свої гормони, що забезпечують регуляцію процесів метаболізму та функції різних органів організму. Їхня дія спрямована на підтримку фізіологічних умов життєдіяльності організму під час фізичних навантажень, холоду, голоду, травми чи інших стресових станів, що виражається у підвищенні глюкози в крові, прискоренні енергетичного обміну у скелетних м'язах, мозку тощо [12; 29; 33].

Утворення та секреція деяких гормонів має виражену добову та вікову циклічність [17]. Так, добові коливання рівня соматотропного гормону пов'язані з циклами сну, а для статевих гормонів характерна не лише добова циклічність утворення і секреції, а й чітко виражена вікова, місячна (менструальна) та інші циклічності. Гормони мають певний час життя, після чого інактивуються різними шляхами. Так, зокрема, інактивація гормону інсуліну в організмі людини відбувається шляхом міграції його у клітини та розщеплення ферментами – протеазами і пептидазами, гормону адреналіну – перетворенням його на неактивні сполуки в печінці та виведенням нирками, стероїдних гормонів – хімічним перетворенням молекул та виведенням з організму [27; 29].

Отже, концентрація гормонів у крові, з одного боку, залежить від інтенсивності синтезу і секреції гормону залозою, а з іншого – від швидкості руйнування та виведення їх з організму. У дослідженнях О.В. Майданюк та ін. [1] виявлено, що співвідношення між потужністю фізичного навантаження та амплітудою змін умісту різних гормонів у крові спортсменів високого рівня не є однаковим. Це підкреслює складність регуляторних механізмів і важливість індивідуального підходу до аналізу гормональних змін.

Як показано в роботах В.Є. Виноградова та ін. [37; 38], проведення спеціальних відновних комплексів у передзмагальний період призводило до зниження концентрації кортизону в крові спортсменів-веслувальників, при цьому величина змін була індивідуальною і залежала від тривалості відпочинку після застосування комплексу вправ.

У роботах О.В. Майданюк та ін. [25] встановлено кореляційний взаємозв'язок між аеробними можливостями спортсменів, зокрема показником максимального споживання кисню та рівнями тестостерону, кортизолу й інсуліну після фізичного навантаження. Цей взаємозв'язок підкреслює важливість аналізу гормональних змін для оцінки функціонального стану спортсменів.

У цьому зв'язку дослідження метаболізму гормонів та їхньої регуляторної дії в організмі спортсменів вимагає наявності спеціальних методичних підходів, урахування періоду підготовки, застосування відновних засобів, тривалості відпочинку та індивідуальних особливостей організму.

Ендокринні залози не завжди функціонують у межах фізіологічної норми. Їхня функція може бути підвищена (гіперфункція) або знижена (гіпофункція). Такі зміни можуть бути короткочасними або ж мати тривалий та постійний характер, що призводить для певної хвороби [12; 15; 27].

Існують три основні напрями гормональної регуляції внутрішньоклітинного метаболізму організму, а саме: регуляція активності ферментів (активація чи пригнічення діяльності ферменту); біосинтез ферментів (збільшення або зменшення їх кількості); проникливість клітинних мембран для окремих речовин.

В останні роки розшифровано декілька сигнальних шляхів регуляторної дії гормонів на метаболічні процеси у клітинах-мішенях. Виявлено, що під час передачі дії гормону (первинного месенджера або посередника) на біохімічний чи фізіологічний процес усередині клітини задіяний каскад біохімічних перетворень низки речовин: вторинних месенджерів (передавачів), ферментів – протеїнкіназ, що модифікують (фосфорилують) молекули інших білків – ферментів та забезпечують кінцеву регуляцію певного процесу. За участі посередників, наприклад цАМФ, спостерігається багатократне підсилення сигналу [14; 21; 32].

Передача гормональної дії на процеси метаболізму в клітинах-мішенях може здійснюватися сигнальними шляхами із залученням різних механізмів, а саме: аденілатциклазного та вторинного посередника циклічного АМФ (цАМФ); гуанілатциклазного та вторинного посередника циклічного ГМФ; інозитолфосфатного та вторинних посередників інозитолфосфата, діацилгліцерола та іонів Ca^{2+} ; Ca^{2+} -кальмодулін – активованої протеїнкінази; транскрипційного, що характерний для передачі дії гормонів стероїдної природи [27; 29].

Для забезпечення м'язової діяльності дуже важливим є своєчасне активування процесу розпаду глікогену – вуглеводного енергетичного резерву [7; 21; 25]. Основними гормонами, що регулюють активність ферментів розпаду глікогену в печінці, є гормон підшлункової залози глюкагон, а також гормони мозкового шару наднирників – адреналін та норадреналін, що також сприяють розпаду глікогена й у скелетних м'язах. Вони не проникають усередину клітин печінки та м'язів, тому регулюють процес розпаду глікогену до молекул глюкози, взаємодіючи з поверхневими мембранними рецепторами [7; 21; 22].

Під час утворення гормон-рецепторного комплексу запускається сигнальний шлях усередині клітин печінки. Цікавим є те, що на плазматичній мембрані клітин печінки розташовані α_1 - та β -адренорецептори до адреналіну, тому передача регуляторної дії гормону через ці рецептори забезпечується різними сигнальними шляхами, і при цьому відбуваються різні відповіді клітин. Механізм дії гормонів, що забезпечується аденілатциклазною системою, характерний для багатьох гормонів, при цьому одні гормони активують цей шлях: гіпофізу (ТТГ, ЛГ, МСГ, ФСГ, АКТГ), адреналін (через β -адренорецептори), глюкагон, кальцитонін, соматостатин, паратгормон, вазопресин, а інші пригнічують (адреналін через α_2 -адренорецептор, ангіотензин 2) [4; 8; 16].

Спочатку гормон (первинний месенджер) взаємодіє з рецептором з утворенням гормон-рецепторного комплексу. Після цього рецептор контактує зі складним G-білком, що розташований на внутрішній поверхні плазматичної мембрани та активує його. G-білок складається з трьох субодиниць. Завдяки наявності тримірної структури G-білок виконує функцію «годинника» клітини, оскільки, взаємодіючи з рецептором, він може зв'язуватися або з ГТФ, або з ГДФ, які будуть взаємодіяти з ферментом аденілатциклазою і або активувати, або пригнічувати її активність [14; 29]. Активована аденілатциклаза, що розташована на внутрішній поверхні мембрани клітин, запускає реакцію синтезу циклічного АМФ (цАМФ або 3',5', -АМФ) з АТФ.

Утворена молекула цАМФ є «вторинним месенджером» дії гормону всередині клітини. Циклічний АМФ є активатором ферменту – цАМФ-залежної протеїнкінази (ПК), яка розташована у цитоплазмі і за відсутності молекул цАМФ неактивна. За збільшення концентрації цАМФ протеїнкіназа зв'язується з ним і переходить в активну форму та каталізує реакцію фосфорилування різних білків усередині клітини за участю АТФ.

Гормональний сигнал аденілатциклазного механізму всередині клітини припиняється завдяки гідролітичному розщепленню циклічного АМФ ферментом фосфодіестеразою до молекули 5'АМФ. У результаті цього припиняється регуляторна дія гормону на метаболічний процес.

Механізм регуляції різних процесів у клітині через вторинні посередники дуже ефективний, оскільки значно підсилюється гормональний сигнал, що забезпечує швидку біологічну відповідь клітини на підвищення концентрації гормонів в крові. Аденілатциклазна система забезпечує включення миттєвих механізмів перебудови внутрішньоклітинного обміну при різних станах, зокрема під час фізичних навантажень, та бере участь у забезпеченні термінової

біохімічної адаптації організму до впливу фізичних навантажень. Із ростом ступеня адаптації організму вдосконалюється аденілатциклазна система передачі гормональних сигналів у скелетних м'язах, що проявляється підвищенням чутливості ферменту аденілатциклази до гормонів, протеїнкіназ до цАМФ, а це дає змогу виконувати більш тонку регуляцію внутрішньоклітинного обміну речовин за незначних змін рівня гормонів у крові [14; 21; 23].

Гормональний сигнал може передаватися також за допомогою гуанілатциклазної системи, яка синтезує внутрішньоклітинний передатчик циклічний ГМФ (цГМФ) з ГТФ, аналогічно аденілатциклазній системі. Протилежні ефекти одного й того ж гормону можуть забезпечуватися різними передавачами – цАМФ або цГМФ. Передача регуляторної дії гормонів через специфічні α_1 -адренорецептори забезпечується інозитолфосфатним механізмом, у якому роль вторинних месенджерів виконують молекули ІТФ, ДАГ та іони Ca^{2+} . Під час взаємодії окремих гормонів із рецепторами активується система транспорту іонів Ca^{2+} через мембрану. Кальцій потрапляє у цитоплазму клітин із зовнішнього середовища або з внутрішньоклітинних депо. Він зв'язується з Ca^{2+} -залежними білками, одним з яких є кальмодулін, та активує Ca^{2+} -кальмодулін-залежну протеїнкіназу. Цей фермент підвищує активність різних внутрішньоклітинних ферментів, що веде до зміни біохімічних процесів та фізіологічних функцій [14; 23].

Регуляція біосинтезу білків, у тому числі білків-ферментів, рецепторів, скоротливих та структурних білків, має велике значення для спортсменів, оскільки саме ці процеси забезпечують адаптацію організму до фізичних навантажень. Така регуляція здійснюється гормонами стероїдної природи та тими, які можуть проникати всередину клітини. Окрім стероїдних гормонів (тестостерон та естрадіол, кортизол, гормон Д), таку регуляцію здійснюють тиреоїдні гормони щитоподібної залози (трийодтиронін та тироксин). Вони мають гідрофобні молекули, що здатні шляхом простої дифузії проникати всередину клітин, а також гормон інсулін, рецептор якого є інтегральним білком (тирозинкіназа), що пронизує мембрану і дає змогу проникнути, а також рецептор фактору росту [21; 29].

Регуляторна дія цих гормонів на процеси метаболізму забезпечуються транскрипційним механізмом. У цитозолі ці гормони взаємодіють зі специфічними внутрішньоклітинними чи ядерними рецепторами. Утворений цитозольний гормон-рецепторний комплекс потрапляє у ядро, де зв'язується з хроматином, або ядерним рецептором, і активує окремі гени на молекулі ДНК, що сприяє синтезу іРНК або початку етапу транскрипції синтезу окремих білків (виступає індуктором), або пригнічує процес транскрипції (виступає репресором). Молекула іРНК виходить із ядра, потрапляє до рибосом та запускає процес синтезу (етап трансляції) нових конкретних білків, які можуть бути структурними чи скоротливими білками м'язів та інших тканин, або ферментами чи гормонами. Тому стероїдні гормони проявляють сильну анаболічну дію. Вони активують процеси відновлення організму після фізичних тренувань та ріст м'язової маси. Проте швидкість процесів білкового синтезу в клітинах – відносно повільний процес, оскільки вимагає великої кількості енергії та «будівельного» матеріалу, тому такі гормони не можуть здійснювати швидкий контроль процесів метаболізму. Основна їхня функція полягає у регуляції процесів росту, розвитку та диференціювання клітин організму [10; 18; 31].

В організмі спортсменів стероїдні гормони запускають процеси термінової та довготривалої біохімічної адаптації, збільшуючи швидкість синтезу білків у певний період відновлення організму після тренувань.

Для деяких гормонів, зокрема інсуліну, а також нейромедіаторів характерна регуляція проникливості плазматичної мембрани для цілої низки речовин. Наприклад, гормон інсулін не проникає усередину клітин та регулює проникливість глюкози з плазми крові у клітини-мішені, якими є м'язові волокна, жирові клітини та частково клітини печінки [7; 30; 36]. Під час його зв'язування з рецептором різко збільшує проникливість глюкози, амінокислот, окремих іонів через мембрани, що сприяє надходженню їх усередину клітини. Молекулярні основи такої регуляції до кінця не вивчено. Тим паче підвищене проникнення окремих речовин у клітину діє на різні біохімічні процеси обміну вуглеводів та білків, а перерозподіл іонів на мембрані діє на електричний потенціал клітини та її функції.

За умов фізичних навантажень спостерігається зміна функцій багатьох ендокринних залоз, особливо тих, які беруть участь у формуванні загальної адаптації організму до стресових чинників. Значуща роль для запуску адаптаційного процесу під час фізичних тренувань та інших видів стресу належить гіпоталамус-гіпофіз-наднирниковій вісі [10; 17; 19].

Величина та напрям зміни функцій окремих ендокринних залоз залежить від їхньої участі у забезпеченні метаболічних процесів під час тренування, а також від інтенсивності, тривалості фізичних навантажень та ступеню тренуваності організму. Під час тривалих фізичних навантажень секреторна функція багатьох залоз посилюється, й у крові збільшується кількість гормонів, що стимулює процеси енергозабезпечення і фізичну працездатність організму. Кількість гормонів у плазмі крові залежить від: кількості включених у роботу м'язових волокон; обсягу виконуваної м'язової роботи; спрямованості фізичних тренувань (робота силового напрямку чи на витривалість); рівня фізичної підготовленості чи тренуваності; тривалості інтервалів відпочинку між тренуваннями тощо.

Під час довготривалої виснажливої фізичної роботи секреція гормонів у крові знижується. Можливе виснаження функцій ендокринних залоз, що супроводжується зниженням рівня гормонів у крові та фізичної працездатності, розвитком стомлення [1; 19; 25].

В останній час показано, що під час виконання різних тренувальних вправ (силових чи на витривалість) включаються різні механізми (сигнальні шляхи) гормональної регуляції процесів метаболізму у скелетних м'язах спортсмена, що призводить або до активації біосинтезу скоротливих білків та гіпертрофії м'язів, або до активації синтезу білків-ферментів та збільшення кількості мітохондрій [15; 21]. Систематична м'язова діяльність посилює потенційні можливості ендокринних залоз, викликає підвищення запасів гормонів, хоча рівень окремих гормонів (тироксину, інсуліну) в крові у стані спокою знижений. Однак під дією фізичних навантажень у тренуваному організмі відбувається посилення секреції гормонів завдяки гіпертрофії залоз або покращенню регулюючих їх процесів. При цьому вдосконалюються механізми передачі дії гормонів. Спостерігається підвищення кількості вторинного передавача – цАМФ у м'язах, підвищення чутливості ферментів до передавача або рецепторів до гормонів, що сприяє утриманню високої фізичної працездатності організму [15; 21; 28].

Причинами порушення гормональної регуляції можуть бути: зміна структури та функції ендокринної залози синтезувати та викидати в кров гормон (гіпо- чи гіперфункція); утворення неповноцінної структури гормону, наприклад інсуліну, за дозрівання білка або відсутності іону цинку; зміна кількості або чутливості білків – транспортерів гормонів (СТГ, T_4 , T_3 тощо); зміна якості та кількості рецепторів: генетичні зміни структури рецептора, недостатність синтезу білків-рецепторів, блокування білків-рецепторів; зміна структури плазматичної мембрани або інша причина неможливості передачі гормональної дії сигнальним шляхом; зміни регуляції ендокринної системи за участю ЦНС чи речовин-метаболітів [12; 29; 35].

Висновки. Гормональна регуляція відіграє провідну роль у метаболічній адаптації до фізичних навантажень, забезпечуючи підтримання гомеостазу, мобілізацію енергетичних субстратів і формування тривалих адаптаційних змін. Гормони діють комплексно, узгоджено впливаючи на метаболізм (вуглеводний, ліпідний і білковий обміни). Кожна група гормонів виконує специфічні функції у процесі регуляції метаболізму під час та після фізичних навантажень. Їх взаємодія визначає ефективність енергозабезпечення м'язової діяльності та відновлення після навантаження. Ключовим механізмом дії гормонів є активація внутрішньоклітинних сигнальних шляхів, що забезпечують швидкі та довготривалі відповіді тканин. Для кращого розуміння молекулярних основ адаптації організму спортсмена до тренувань необхідне подальше проведення наукових досліджень для виявлення мережі прямих і перехресних зв'язків включення внутрішньоклітинних сигнальних шляхів під час різних фізичних навантажень, які викликають специфічні зміни в експресії генів і білків у скелетних м'язах та інших тканинах. Порушення гормональної регуляції можуть свідчити про перевантаження, перетренованість або недостатнє відновлення. Саме тому моніторинг гормонального статусу є важливим інструментом у практиці спорту.

Література:

1. Майданюк О.В., Вдовенко Н.В. Вплив інтенсивних фізичних навантажень на концентрацію тестостерону, кортизолу та інсуліну в крові кваліфікованих спортсменів. *Проблеми ендокринної патології*. 2021. № 76(2). С. 49–55. <https://doi.org/10.21856/j-PEP.2021.2.07>.
2. Alemany M. The Roles of Androgens in Humans: Biology, Metabolic Regulation and Health. *International journal of molecular sciences*. 2002. № 23(19). P. 11952. <https://doi.org/10.3390/ijms231911952>.
3. Cadegiani F.A., Kater C.E. Hormonal aspects of overtraining syndrome: a systematic review. *BMC Sports Sci Med Rehabil*. 2017. № 9. P. 14. <https://doi.org/10.1186/s13102-017-0079-8>.
4. Chen J.D. Steroid/nuclear receptor coactivators. *Vitam Horm*. 2000. № 58. P. 391–448. [https://doi.org/10.1016/s0083-6729\(00\)58032-7](https://doi.org/10.1016/s0083-6729(00)58032-7).
5. Chmura P., Podgórski T., Konefał M., Rokita A., Chmura J., Andrzejewski M. Endocrine Responses to Various 1 × 1 Small-Sided Games in Youth Soccer Players. *International journal of environmental research and public health*. 2019. № 16(24). P. 4974. <https://doi.org/10.3390/ijerph16244974>.
6. Devlin T.M. Textbook of biochemistry: with clinical correlations. 7th ed.; John Wiley & Sons, Inc. 2011. 1204 p.
7. Flores-Opazo M., McGee S.L., Hargreaves M. Exercise and GLUT4. *Exercise and sport sciences reviews*. 2020. № 48(3). P. 110–118. <https://doi.org/10.1249/JES.0000000000000224>.
8. Gashi A.I., Gontarev S., Zivkovic V., Gjorgovski I., Azemi A. The Effect of Aerobic Physical Activity in Adrenaline Level in White Laboratory Rats. *Medical archives (Sarajevo, Bosnia and Herzegovina)*. 2020. № 74(2). P. 84–89. <https://doi.org/10.5455/medarh.2020.74.84-89>.
9. Gaviglio C.M. The efficacy of salivary testosterone and cortisol as a biomarker of training and competition in elite rugby union athletes. PhD Thesis, The University of Queensland, 2018. 126 p.
10. Hackney A.C., Constantini N.W. Endocrinology of physical activity and sport. Humana, 2020. 1609 p.
11. Hackney A.C., Viru A. Research methodology: endocrinologic measurements in exercise science and sports medicine. *J Athl Train*. 2008. № 43(6). P. 631–639. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-43.6.631>.
12. Hirschberg A.L. Female hyperandrogenism and elite sport. *Endocr Connect*. 2020. № 9(4). P. R81–R92. <https://doi.org/10.1530/EC-19-0537>.
13. Holt E.H., Lupsa B., Lee G.S., McCance K.L. Goodman's basic medical endocrinology. Elsevier. 2021. 552 p.
14. Horn F., Bettler E., Oliveira L., Campagne F., Cohen F.E., Vriend G. GPCRDB information system for G protein-coupled receptors. *Nucleic acids research*. 2003. № 31(1). P. 294–297. <https://doi.org/10.1093/nar/gkg103>.
15. Houston M.E. Biochemistry primer for exercise science. Human Kinetics, 2006. 267 p.
16. Jessen S., Quesada J.P., Di Credico A., Moreno-Justicia R., Wilson R., Jacobson G., Bangsbo J., Deshmukh A.S., Hostrup M. Beta₂-Adrenergic Stimulation Induces Resistance Training-Like Adaptations in Human Skeletal Muscle: Potential Role of KLHL41. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*. 2024. № 34(10). P. e14736. <https://doi.org/10.1111/sms.14736>.
17. Kenney W.L., Wilmore J.H., Costill D.L. Physiology of sport and exercise. 5th ed.; Human Kinetics, 2012. 622 p.
18. Kleina B., Rossmanith W.G. Hormones and the endocrine System: Textbook of Endocrinology. Springer, 2016. 437 p.
19. Knezevic E., Nenic K., Milanovic V., Knezevic N.N. The Role of Cortisol in Chronic Stress, Neurodegenerative Diseases, and Psychological Disorders. *Cells*. 2023. № 12. P. 2726. <https://doi.org/10.3390/cells12232726>.
20. Kotikangas J., Walker S., Toivonen S., Peltonen H., Häkkinen K. Acute Neuromuscular and Hormonal Responses to Power, Strength, and Hypertrophic Protocols and Training Background. *Frontiers in sports and active living*. 2022. № 4. P. 919228. <https://doi.org/10.3389/fspor.2022.919228>.
21. Kraemer W.J., Ratamess N.A. Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training. *Sports Med*. 2005. № 35(4). P. 339–361. <https://doi.org/10.2165/00007256-200535040-00004>.

22. Łacka K., Czyżyk A. Hormones and the cardiovascular system. *Endokrynol Pol.* 2008. № 59. P. 420–433.
23. Lodish H., Berk A., Kaiser C.A., Krieger M., Bretscher A., Ploegh H., Amon A., Martin K.C. *Molecular Cell Biology*. W. H. Freeman, 2021. 1264 p.
24. MacLaren D., Morton J. *Biochemistry for sport and exercise metabolism*. John Wiley and Sons Ltd., 2024. 352 p.
25. Maidaniuk O., Vdovenko N., Husarova A. Effect of Intensive Physical Loads on Plasma Testosterone and Cortisol Concentration in Elite Athletes. *Physical Education Theory and Methodology*. 2022. № 22(3). P. 379–385. <https://doi.org/10.17309/tmfv.2022.3.12>.
26. Maidaniuk O., Vdovenko N., Rossokha H., Husarova A. Dynamics of insulin and glucose changes during the early recovery after physical loads in elite athletes. *The Journal of Physical Education and Sport*. 2024. № 24(11). P. 2034–2039.
27. Marshall W.J., Lapsley M., Day A.P., Ayling R.M. *Clinical biochemistry metabolic and clinical aspects*. 2014. 932 p.
28. Mougios V. *Exercise biochemistry*. Human Kinetics, 2006. 332 p.
29. Nelson D.L., Cox M.M. *Lehninger Principles of Biochemistry*. WH. Freeman, 2017. 1308 p.
30. Richter E.A. Is GLUT4 translocation the answer to exercise-stimulated muscle glucose uptake? *American journal of physiology. Endocrinology and metabolism*. 2021. № 320(2). P. E240–E243. DOI: <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00503.2020>.
31. Rodwell V.W., Bender D.A., Botham K.M., Kennelly P.J., Weil P.A. *Harper's illustrated biochemistry*. McGraw-Hill Education, 2018. 2023 p.
32. Schumann M., Walker S., Izquierdo M., Newton R.U., Kraemer W.J., Häkkinen K. The order effect of combined endurance and strength loadings on force and hormone responses: effects of prolonged training. *Eur J Appl Physiol*. 2014. № 114(4). P. 867–880. <https://doi.org/10.1007/s00421-013-2813-6>.
33. Sharples A., Morton J., Wackerhage H. *Molecular Exercise Physiology*. London: Routledge, 2022. 358 p.
34. Spurway N., Wackerhage H. *Genetics and molecular biology of muscle adaptation*. Edinburgh: Churchill Livingstone Elsevier, 2006. 274 p.
35. Steinacker J.M., Lormes W., Reissnecker S., Liu Y. New aspects of the hormone and cytokine response to training. *Eur J Appl Physiol*. 2004. № 91(4). P. 382–391. <https://doi.org/10.1007/s00421-003-0960-x>.
36. Petersen M.C., Shulman G.I. Mechanisms of Insulin Action and Insulin Resistance. *Physiol. Rev.* 2018. № 98. P. 2133–2223. <https://doi.org/10.1152/physrev.00063.2017>.
37. Vynohradov V., Osypenko G., Ilyin V., Vynogradova O., Rusanova O. Effect of special exercises on blood biochemical indices in highly skilled male rowers during pre-start preparation. *Journal of Physical Education and Sport*. 2021. № 21(1). P. 236–242. <https://doi.org/10.7752/jpes.2021.01031>.
38. Vynohradov V., Osypenko G., Ilyin V., Vynogradova O., Rusanova O. Effect of special exercises on blood biochemical indices in highly skilled athletes of cyclic sports events with endurance manifestation during pre-start preparation. *Journal of Physical Education and Sport*. 2020. № 20(5). P. 2725–2734. <https://doi.org/10.7752/jpes.2020.05371>.

References:

1. Maidanyuk, E.V., & Vdovenko, N.V. (2021). Vplyv intensyvnnykh fizychnykh navantazhen na kontsentratsiyu testosteronu, kortyzolu ta insulinu v krovi kvalifikovanykh sportsmeniv [Effect of intensive physical loads on testosterone, cortisol and insulin blood concentrations in elite athletes]. *Problems of Endocrine Pathology*, 76(2), 49–55. <https://doi.org/10.21856/j-PEP.2021.2.07> [in Ukrainian].
2. Alemany, M. (2022). The Roles of Androgens in Humans: Biology, Metabolic Regulation and Health. *International journal of molecular sciences*, 23(19), 11952. <https://doi.org/10.3390/ijms231911952> [in English].
3. Cadegiani, F.A., & Kater, C.E. (2017). Hormonal aspects of overtraining syndrome: a systematic review. *BMC sports science, medicine & rehabilitation*, 9, 14. <https://doi.org/10.1186/s13102-017-0079-8> [in English].

4. Chen, J.D. (2000). Steroid/nuclear receptor coactivators. *Vitamins and hormones*, 58, 391–448. [https://doi.org/10.1016/s0083-6729\(00\)58032-7](https://doi.org/10.1016/s0083-6729(00)58032-7) [in English].
5. Chmura, P., Podgórski, T., Konefał, M., Rokita, A., Chmura, J., & Andrzejewski, M. (2019). Endocrine Responses to Various 1 × 1 Small-Sided Games in Youth Soccer Players. *International journal of environmental research and public health*, 16(24), 4974. <https://doi.org/10.3390/ijerph16244974> [in English].
6. Devlin, T.M. (2011). Textbook of biochemisrry: with clinical correlations. 7th ed.; John Wiley & Sons, Inc. [in English].
7. Flores-Opazo, M., McGee, S.L., & Hargreaves, M. (2020). Exercise and GLUT4. *Exercise and sport sciences reviews*, 48(3), 110–118. <https://doi.org/10.1249/JES.0000000000000224> [in English].
8. Gashi, A.I., Gontarev, S., Zivkovic, V., Gjorgovski, I., & Azemi, A. (2020). The Effect of Aerobic Physical Activity in Adrenaline Level in White Laboratory Rats. *Medical archives (Sarajevo, Bosnia and Herzegovina)*, 74(2), 84–89. <https://doi.org/10.5455/medarh.2020.74.84-89> [in English].
9. Gaviglio, C.M. (2018). *The efficacy of salivary testosterone and cortisol as a biomarker of training and competition in elite rugby union athletes* [PhD Thesis]. The University of Queensland [in English].
10. Hackney, A.C., & Constantini, N.W. (2020). Endocrinology of physical activity and sport. *Humana*. [in English].
11. Hackney, A.C., & Viru, A. (2008). Research methodology: endocrinologic measurements in exercise science and sports medicine. *Journal of athletic training*, 43(6), 631–639. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-43.6.631> [in English].
12. Hirschberg, A.L. (2020). Female hyperandrogenism and elite sport. *Endocrine connections*, 9(4), R81–R92. <https://doi.org/10.1530/EC-19-0537> [in English].
13. Holt, E.H., Lupsa, B., Lee, G.S., & McCance, K.L. (2021). *Goodman's basic medical endocrinology*. Elsevier. [in English].
14. Horn, F., Bettler, E., Oliveira, L., Campagne, F., Cohen, F.E., & Vriend, G. (2003). GPCRDB information system for G protein-coupled receptors. *Nucleic acids research*, 31(1), 294–297. <https://doi.org/10.1093/nar/gkg103>.
15. Houston, M.E. (2006). Biochemistry primer for exercise science. *Human Kinetics*. [in English].
16. Jessen, S., Quesada, J.P., Di Credico, A., Moreno-Justicia, R., Wilson, R., Jacobson, G., Bangsbo, J., Deshmukh, A.S., & Hostrup, M. (2024). Beta₂-Adrenergic Stimulation Induces Resistance Training-Like Adaptations in Human Skeletal Muscle: Potential Role of KLHL41. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 34(10), e14736. <https://doi.org/10.1111/sms.14736> [in English].
17. Kenney, W.L., Wilmore, J.H., & Costill D.L. (2012). Physiology of sport and exercise. *Human Kinetics* [in English].
18. Kleine, B., & Rossmanith, W.G. (2016). Hormones and the endocrine System: Textbook of Endocrinology. Springer [in English].
19. Knezevic, E., Nenic, K., Milanovic, V., & Knezevic, N.N. (2023). The Role of Cortisol in Chronic Stress, Neurodegenerative Diseases, and Psychological Disorders. *Cells*, 12(23), 2726. <https://doi.org/10.3390/cells12232726> [in English].
20. Kotikangas, J., Walker, S., Toivonen, S., Peltonen, H., & Häkkinen, K. (2022). Acute Neuromuscular and Hormonal Responses to Power, Strength, and Hypertrophic Protocols and Training Background. *Frontiers in sports and active living*, 4, 919228. <https://doi.org/10.3389/fspor.2022.919228> [in English].
21. Kraemer, W.J., & Ratamess, N.A. (2005). Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 35(4), 339–361. <https://doi.org/10.2165/00007256-200535040-00004> [in English].
22. Lacka, K., & Czyżyk, A. (2008). Hormony a układ sercowo-naczyniowy [Hormones and the cardiovascular system]. *Endokrynologia Polska*, 59(5), 420–432 [in Polska].
23. Lodish, H., Berk, A., Kaiser, C.A., Krieger, M., Bretscher, A., Ploegh, H., Amon, A., & Martin, K.C. (2021). *Molecular cell biology*. W.H. Freeman. [in English].

24. MacLaren, D., & Morton, J. (2024). *Biochemistry for sport and exercise metabolism*. John Wiley and Sons Ltd. [in English].
25. Maidaniuk, O., Vdovenko, N., & Husarova, A. (2022). Effect of Intensive Physical Loads on Plasma Testosterone and Cortisol Concentration in Elite Athletes. *Physical Education Theory and Methodology*, 22(3), 379–385. <https://doi.org/10.17309/tmfv.2022.3.12> [in English].
26. Maidaniuk, O., Vdovenko, N., Rossokha, H., & Husarova, A. (2024). Dynamics of insulin and glucose changes during the early recovery after physical loads in elite athletes. *The Journal of Physical Education and Sport*, 24(11), 2034–2039 [in English].
27. Marshall, W.J., Lapsley, M., Day, A.P., & Ayling, R.M. (2014). *Clinical biochemistry metabolic and clinical aspects*. Elsevier Limited. [in English].
28. Mougios, V. (2006). *Exercise biochemistry*. Human Kinetics. [in English].
29. Nelson, D.L., & Cox, M.M. (2017). *Lehninger principles of biochemistry*. W.H. Freeman. [in English].
30. Richter, E.A. (2021). Is GLUT4 translocation the answer to exercise-stimulated muscle glucose uptake?. *American journal of physiology. Endocrinology and metabolism*, 320(2), E240–E243. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00503.2020> [in English].
31. Rodwell, V.W., Bender, D.A., Botham, K.M., Kennelly, P.J., & Weil, P.A. (2018). *Harper's illustrated biochemistry*. McGraw-Hill Education. [in English].
32. Schumann, M., Walker, S., Izquierdo, M., Newton, R.U., Kraemer, W.J., & Häkkinen, K. (2014). The order effect of combined endurance and strength loadings on force and hormone responses: effects of prolonged training. *European journal of applied physiology*, 114(4), 867–880. <https://doi.org/10.1007/s00421-013-2813-6> [in English].
33. Sharples, A., Morton, J., & Wackerhage, H. (2022). *Molecular Exercise Physiology*. London : Routledge. [in English].
34. Spurway, N., & Wackerhage, H. (2006). *Genetics and molecular biology of muscle adaptation*. Churchill Livingstone Elsevier. [in English].
35. Steinacker, J.M., Lormes, W., Reissnecker, S., & Liu, Y. (2004). New aspects of the hormone and cytokine response to training. *European journal of applied physiology*, 91(4), 382–391. <https://doi.org/10.1007/s00421-003-0960-x> [in English].
36. Petersen, M.C., & Shulman, G.I. (2018). Mechanisms of Insulin Action and Insulin Resistance. *Physiological reviews*, 98(4), 2133–2223. <https://doi.org/10.1152/physrev.00063.2017> [in English].
37. Vynohradov, V., Osypenko, G., Ilyin, V., Vynogradova, O., & Rusanova, O. (2021). Effect of special exercises on blood biochemical indices in highly skilled male rowers during pre-start preparation. *Journal of Physical Education and Sport*, 21(1), 236–242. <https://doi.org/10.7752/jpes.2021.01031> [in English].
38. Vynohradov, V., Osypenko, G., Ilyin, V., Vynogradova, O., & Rusanova, O. (2020). Effect of special exercises on blood biochemical indices in highly skilled athletes of cyclic sports events with endurance manifestation during pre-start preparation. *Journal of Physical Education and Sport*, 20(5), 2725–2734. <https://doi.org/10.7752/jpes.2020.05371> [in English].

**Osypenko Anna, Vdovenko Nataliia, Khmelnytska Yuliia,
Husarova Anna, Rossokha Halyna**

THE ROLE OF HORMONES IN METABOLIC ADAPTATION TO PHYSICAL LOADS

Relevance of the problem. *The hormonal, or endocrine, system plays a crucial role in maintaining normal functioning of physiological systems and restructuring metabolism during both acute and long-term adaptation to physical loads. It is involved in recovery after stress and regulates these processes through the secretion of hormones. Proper functioning is essential for physiological and psychological homeostasis. Hormonal imbalance, caused by excessive or insufficient physical load, may lead to functional exhaustion, reduced anabolic hormone levels, chronic fatigue, and decreased performance. The hormonal system is key in the biochemical mechanisms underlying athletes' adaptation to physical loads. Understanding hormonal action mechanisms, their interactions with enzymatic systems, protein biosynthesis, and cellular membrane permeability offers potential for optimising*

training, preventing overtraining, and achieving high performance. **The purpose** of the study is to summarise current data on the role of hormones in the metabolic adaptation of the human body to physical loads. **Methods.** Theoretical analysis and synthesis of data from contemporary scientific literature and academic publications indexed in databases such as PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar. **Results.** Hormonal regulation plays a crucial role in metabolic adaptation to physical loads by maintaining homeostasis, mobilising energy substrates, and facilitating long-term adaptive changes. Hormones act in a coordinated and integrated manner to regulate carbohydrate, lipid, and protein metabolism. Each hormone group performs specific regulatory functions during and after physical activity. Their interaction determines the efficiency of energy supply to working muscles and the effectiveness of post-exercise recovery. A key mechanism of hormonal action is the activation of intracellular signalling pathways that mediate both rapid and long-term tissue responses. Disruptions in hormonal regulation may indicate overload, overtraining, or insufficient recovery. Therefore, monitoring hormonal status is an essential tool in sports science and practice.

Key words: hormonal regulation, metabolism, physical exercise, muscular activity, athletes.

Дата надходження статті: 31.07.2025

Дата прийняття статті: 29.08.2025

Опубліковано: 23.10.2025