

ГУЛАЙ Ольга

доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри цифрових освітніх технологій

Луцький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-1120-6165>e-mail: o.hulai@lntu.edu.ua**САВЧУК Сергій**

кандидат з фізичного виховання та спорту, доцент, доцент кафедри фізичної культури, спорту та здоров'я,

Луцький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0422-8582>e-mail: ser.savchuk@lutsk-ntu.com.ua**ОКИСНЕННЯ ЛІПІДІВ ПІД ЧАС ТРИВАЛОЇ ФІЗИЧНОЇ АКТИВНОСТІ: МЕХАНІЗМ ТА СУЧАСНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Статтю присвячено аналізу сучасних уявлень про окиснення ліпідів як ключовий механізм енергозабезпечення організму під час тривалої фізичної активності. Узагальнено результати сучасних вітчизняних і зарубіжних досліджень щодо біохімічних механізмів мобілізації, транспорту та β -окиснення жирних кислот у процесі м'язової діяльності. Висвітлено особливості використання ліпідів залежно від інтенсивності та тривалості фізичного навантаження, рівня тренуваності й гормональної регуляції. Показано, що за умов тривалої фізичної роботи окиснення жирних кислот забезпечує економне використання запасів м'язового глікогену, підтримує стабільне енергозабезпечення та сприяє розвитку метаболічної гнучкості організму. Проаналізовано роль катехоламінів, інсуліну, глюкагону та кортизолу в регуляції ліполізу й окиснення ліпідів, а також адаптаційні зміни, що виникають у відповідь на систематичні тренування. Особливу увагу приділено сучасним методам дослідження ліпідного обміну, серед яких метод стабільних ізотопних трасерів, непряма калориметрія, біохімічний аналіз крові, біопсія скелетних м'язів та молекулярно-біологічні методи визначення експресії генів і білків, пов'язаних із транспортом і окисненням жирних кислот. Охарактеризовано їх можливості, переваги та обмеження у вивченні механізмів енергозабезпечення під час фізичних навантажень. Встановлено, що комплексне застосування сучасних біохімічних, фізіологічних і молекулярних методів забезпечує всебічне дослідження процесів ліпідного обміну на системному, тканинному та клітинному рівнях. Отримані результати можуть бути використані для наукового обґрунтування програм фізичної підготовки, спортивного тренування, медичної реабілітації та персоналізованого підходу до оцінювання метаболічної адаптації організму до фізичних навантажень.

Ключові слова: ліпідний обмін, енергозабезпечення, фізична активність, фізичне навантаження, гормональна регуляція, метаболічна гнучкість, стабільні ізотопні трасери, непряма калориметрія, біопсія скелетних м'язів, молекулярно-біологічні методи.

<https://doi.org/10.31891/pcs.2026.3.3>This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Стаття надійшла до редакції / Received 23.06.2026

Прийнята до друку / Accepted 30.08.2026

Опубліковано / Published 30.09.2026

© ГУЛАЙ Ольга, САВЧУК Сергій

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Актуальність дослідження біохімічних механізмів рухової активності зумовлена зростаючою роллю фізичної активності як ключового чинника збереження здоров'я та профілактики метаболічних порушень у сучасному суспільстві [1]. У міжнародному науковому просторі спостерігається стійка тенденція до поглибленого вивчення процесів енергозабезпечення м'язової діяльності, зокрема ролі β -окиснення жирних кислот у формуванні витривалості та метаболічної гнучкості організму. Водночас в Україні

посилюється увага до впровадження науково обґрунтованих підходів у сфері фізичного виховання, спортивної підготовки та реабілітації [2], що особливо актуалізується в умовах зростання рівня гіподинамії та потреби у відновленні фізичного здоров'я населення.

Важливого значення набуває вивчення та адаптація передового іноземного досвіду дослідження біохімічних механізмів енергозабезпечення організму під час фізичної активності. У провідних наукових центрах Європи, США, Канади та Австралії активно впроваджуються сучасні методи оцінювання ліпідного обміну, зокрема стабільні ізотопні трасери, непряма

калориметрія, молекулярно-біологічні та геномні технології, які дозволяють комплексно досліджувати процеси метаболічної адаптації до фізичних навантажень. В Україні застосування таких підходів поки що є обмеженим, що зумовлює необхідність вивчення міжнародного досвіду, його наукового осмислення та впровадження у практику спортивної медицини, фізичної терапії, реабілітації й фізичного виховання. Таким чином, дослідження біохімічних основ рухової активності відповідає сучасним як світовим, так і національним науковим трендам і має важливе теоретичне та практичне значення.

2. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Перехід організму до активного використання жирів як енергетичного субстрату є складним і багатофакторним процесом, який залежить від інтенсивності, тривалості фізичного навантаження, рівня тренуваності та метаболічного стану організму [13]. Часова динаміка залучення різних енергетичних субстратів під час фізичного навантаження є однією з ключових характеристик метаболічної відповіді організму. На початкових етапах роботи (перші 5–20 хвилин) переважає використання вуглеводів, що пояснюється їх швидкою мобілізацією та здатністю забезпечувати енергію в анаеробних і аеробних умовах. Проте зі збільшенням тривалості навантаження відбувається поступове зростання внеску ліпідів у загальний енергетичний баланс. Це підтверджується дослідженнями, зокрема роботою А. Jeukendrup [8], де показано, що максимальне окиснення жирів спостерігається саме при середніх рівнях інтенсивності фізичного навантаження. Дослідники встановлюють інтенсивність максимального окиснення жирів (Fatmax) – рівень інтенсивності фізичного навантаження, за якого швидкість окиснення жирів досягає максимального значення.

Вивільнені внаслідок ліполізу жирні кислоти транспортуються кров'ю до скелетних м'язів, де проникають у клітини за участю специфічних транспортних білків (зокрема FAT/CD36). Після активації в цитоплазмі вони у вигляді ацил-КоА транспортуються в мітохондрії за допомогою

карнітин-залежної транспортної системи. Важливим дискусійним аспектом залишається співвідношення між транспортом жирних кислот, їх внутрішньом'язовим накопиченням та мітохондріальною утилізацією.

У мітохондріях жирні кислоти вступають у процес β -окиснення, у ході якого відбувається їх поетапне розщеплення з утворенням ацетил-КоА, NADH і FADH₂. Швидкість цього процесу залежить від доступності жирних кислот, активності ферментів і функціонального стану мітохондрій [7]. Ацетил-КоА, що утворюється, включається в Цикл Кребса, де відбувається його повне окиснення до CO₂ з утворенням відновлених коферментів. Останні передають електрони в дихальний ланцюг, що забезпечує синтез аденозинтрифосфату (АТФ) шляхом окисного фосфорилування.

За даними [14], саме взаємодія між β -окисненням і окисненням вуглеводів визначає ефективність енергетичного забезпечення під час фізичного навантаження. Важливо підкреслити, що процес окиснення ліпідів є повністю аеробним і залежить від достатнього постачання кисню. Це обмежує його швидкість при високій інтенсивності навантаження, де перевага надається більш швидким анаеробним шляхам енергозабезпечення, зокрема гліколізу. Таким чином, біохімічний механізм використання жирів є складною багатостадійною системою, яка включає транспорт, активацію та мітохондріальне окиснення жирних кислот, і відіграє ключову роль у забезпеченні енергією при тривалих фізичних навантаженнях. Водночас протиставлення «ліпідного» та «вуглеводного» шляхів є певним спрощенням, оскільки обидві системи функціонують паралельно, а змінюється передусім їх відносний внесок. Дискусійним залишається питання, які саме механізми – доступність субстрату, транспорт жирних кислот чи регуляція мітохондріального окиснення – найбільше обмежують використання жирів за високої інтенсивності навантаження.

Згідно з дослідженнями L. Spriet [15], при виконанні фізичних вправ помірної інтенсивності (близько 45–65 % максимального споживання кисню VO₂max) спостерігається оптимальне співвідношення

між окисненням жирів і вуглеводів, що забезпечує ефективне та стабільне енергопостачання організму. При цьому максимальна швидкість окиснення жирів зазвичай досягається саме в цьому діапазоні інтенсивності.

Результати досліджень останніх років [3; 10] підтверджують, що зі збільшенням інтенсивності фізичного навантаження відбувається поступове зменшення відносного внеску окиснення жирних кислот та зростання використання вуглеводів як основного джерела енергії. Такий метаболічний перехід зумовлений вищою швидкістю синтезу АТФ під час гліколізу, а також обмеженою швидкістю транспорту довголанцюгових жирних кислот через карнітинову транспортну систему до мітохондрій. Унаслідок цього під час високоінтенсивних фізичних вправ організм дедалі більше покладається на окиснення м'язового глікогену та глюкози, тоді як максимальне окиснення жирів спостерігається за навантажень помірної інтенсивності.

Додатково, у роботі J. Hawley [6] підкреслюється, що тривалі навантаження високої інтенсивності ($>70\%$ $\text{VO}_{2\text{max}}$) супроводжуються переважним використанням м'язового глікогену, навіть за наявності достатніх жирових запасів. Це явище пов'язане з необхідністю швидкого ресинтезу аденозинтрифосфату та обмеженнями аеробного окиснення ліпідів.

Сучасні дослідження також акцентують увагу на індивідуальних відмінностях у метаболічній відповіді. Зокрема, за даними A. Muscella та колег [11], рівень тренуваності значно впливає на швидкість окиснення жирів: у тренуваних осіб цей процес активується раніше та досягає вищих значень навіть при відносно високій інтенсивності навантаження. Тренування на витривалість збільшують кількість мітохондрій, активність ферментів β -окиснення, транспорт жирних кислот у м'язові клітини та їх використання як енергетичного субстрату. У тренуваних осіб максимальна швидкість окиснення жирів є вищою і зберігається при більшій відносній інтенсивності навантаження порівняно з нетренуваними особами. Попри загальне підтвердження позитивного впливу тренувань на здатність окиснювати жири, величина цієї адаптації суттєво відрізняється між

досліджуваними та залежить від типу і тривалості тренувань. Крім того, підвищений вміст внутрішньом'язових ліпідів може спостерігатися як у тренуваних спортсменів, так і при метаболічних порушеннях, що потребує оцінювання не лише кількості ліпідів, а й ефективності їх утилізації.

Таким чином, часовий фактор та інтенсивність фізичного навантаження визначають динаміку переключення між енергетичними субстратами. При короткотривалих або високоінтенсивних навантаженнях домінують вуглеводи, тоді як при тривалих навантаженнях помірної інтенсивності зростає роль ліпідів як основного джерела енергії, що відповідає сучасним уявленням про метаболічну гнучкість організму. Дослідження останнього десятиліття достатньо переконливо встановлюють загальні закономірності переключення між ліпідними та вуглеводними субстратами, проте кількісні характеристики цього процесу залишаються варіабельними. Розбіжності результатів значною мірою пов'язані з неоднорідністю досліджуваних груп, різними протоколами фізичного навантаження та застосуванням методів, які характеризують різні рівні метаболізму, що обґрунтовує необхідність їх комплексного використання.

3. ВИДІЛЕНІ АСПЕКТИ ПРОБЛЕМИ, ЯКІ НЕ БУЛИ ВИРІШЕНІ РАНІШЕ

Важливою проблемою залишається зіставлення результатів, отриманих різними методами дослідження ліпідного обміну – непрямою калориметрією, стабільними ізотопними трасерами, біохімічним аналізом крові, біопсією м'язової тканини та молекулярно-біологічними методами. Комплексне використання цих підходів може забезпечити більш повне розуміння механізмів мобілізації та окиснення ліпідів під час фізичних навантажень.

Особливо актуальним для України є обмежене застосування сучасних високоточних методів дослідження субстратного та енергетичного обміну порівняно з провідними зарубіжними науковими центрами. Недостатньо представленими залишаються комплексні дослідження, у яких одночасно оцінюються фізіологічні, біохімічні та молекулярні показники адаптації організму до тривалих

фізичних навантажень. Це зумовлює необхідність систематизації сучасного міжнародного досвіду, визначення найбільш інформативних методичних підходів та оцінювання можливостей їх адаптації й упровадження у вітчизняну наукову практику, спортивну підготовку, фізичну терапію та реабілітацію.

4. ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою статті є узагальнення сучасних теоретичних та експериментальних даних щодо біохімічних механізмів регуляції ліпідного метаболізму під час тривалої фізичної активності, а також систематизація сучасних методичних підходів до

дослідження ліпідного обміну з визначенням перспектив їх застосування у вітчизняній науковій і практичній діяльності.

5. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Гормональна регуляція метаболізму ліпідів під час фізичного навантаження є ключовим механізмом, що забезпечує мобілізацію та подальше окиснення жирних кислот. Вона характеризується складною взаємодією контрінсулярних гормонів, які активують ліполіз, та інсуліну, рівень якого знижується у відповідь на фізичну активність (див. рис. 1).

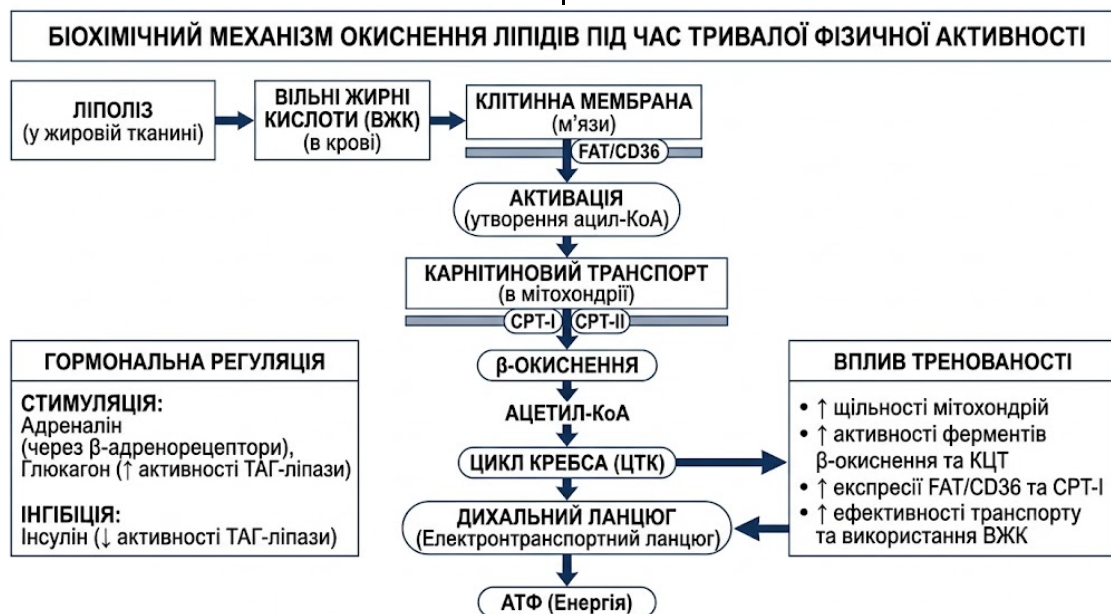


Рис. 1. Схема метаболічного шляху окиснення ліпідів у скелетних м'язах під час тривалої фізичної активності

На рис. 1 узагальнено основні етапи метаболічного використання жирних кислот у скелетних м'язах під час тривалої фізичної активності. Вивільнені внаслідок ліполізу жирні кислоти надходять до м'язових клітин, активуються до ацил-КоА та за участю карнітинової транспортної системи переносяться в мітохондрії. У процесі β-окиснення утворюється ацетил-КоА, який залучається до циклу Кребса, а сформовані відновлені коферменти забезпечують роботу дихального ланцюга й синтез АТФ шляхом окисного фосфорилування. Таким чином, послідовна мобілізація, транспорт і окиснення жирних кислот забезпечують тривале аеробне енергопостачання працюючих м'язів.

Під час фізичного навантаження підвищується секреція катехоламінів

(адреналіну та норадреналіну), які стимулюють активацію гормон-чутливої ліпази в адипоцитах. Це призводить до гідролізу триацилгліцеролів і вивільнення вільних жирних кислот у кровотік. Як показано у огляді [11], саме катехоламіни відіграють провідну роль у регуляції швидкості ліполізу під час аеробного навантаження.

Водночас зниження рівня інсуліну сприяє зменшенню інгібуючого впливу на ліполіз і посиленню мобілізації жирних кислот. Інсулін у стані спокою пригнічує активність ліпази, однак під час фізичної активності його концентрація зменшується, що створює сприятливі умови для активації β-окиснення.

Крім того, значну роль відіграє глюкагон, який стимулює мобілізацію енергетичних

субстратів і сприяє підтриманню рівня глюкози в крові. За даними [8], збільшення співвідношення глюкагону до інсуліну є важливим фактором метаболічного переключення на використання жирів під час тривалих фізичних навантажень.

Сучасні дослідження також підкреслюють роль гормонів тривалого стресу, зокрема кортизолу, який сприяє мобілізації енергетичних ресурсів та підтримує ліполіз при тривалих або інтенсивних навантаженнях. Як зазначає L. Spriet [15], гормональна відповідь організму має адаптивний характер і змінюється залежно від інтенсивності та тривалості фізичної активності.

Окремо слід відзначити вплив тренуваності на гормональну та метаболічну регуляцію енергетичного обміну. Регулярні тренування сприяють підвищенню ефективності ліполітичної відповіді, збільшенню експресії транспортерів жирних кислот, активності ферментів β -окиснення та мітохондріального біогенезу. У тренуваних осіб це забезпечує швидшу мобілізацію й утилізацію жирних кислот, збереження запасів м'язового глікогену та більш економне використання вуглеводів під час тривалого фізичного навантаження. Крім того, фізичні тренування підвищують чутливість тканин до катехоламінів і вдосконалюють гормональну регуляцію ліполізу, що є одним із ключових механізмів метаболічної адаптації до навантажень [5; 7; 11].

Таким чином, гормональна регуляція окиснення ліпідів під час фізичного навантаження є багаторівневим процесом, що включає координовану дію катехоламінів, глюкагону, інсуліну та кортизолу. Її ефективність визначає здатність організму до тривалого енергозабезпечення та адаптації до фізичних навантажень різної інтенсивності.

Рівень фізичної підготовленості суттєво впливає на характер і ефективність використання енергетичних субстратів під час м'язової діяльності. У тренуваних осіб спостерігається підвищена здатність до окиснення ліпідів, що забезпечує економніше використання вуглеводних ресурсів і сприяє підвищенню витривалості.

Як показано у дослідженнях [8], тренувані індивіди характеризуються більш високими показниками максимального окиснення жирів (Fatmax) і здатні

використовувати жири як джерело енергії навіть при відносно високій інтенсивності фізичного навантаження.

Адаптаційні зміни включають:

- збільшення кількості та функціональної активності мітохондрій;
- підвищення активності ферментів β -окиснення;
- покращення транспорту жирних кислот у клітини та мітохондрії;
- збільшення капіляризації м'язової тканини.

За даними [6], ці адаптації сприяють підвищенню метаболічної гнучкості організму – здатності ефективно перемикатися між різними джерелами енергії залежно від умов. Крім того, у тренуваних осіб знижується залежність від м'язового глікогену, що дозволяє відтермінувати розвиток втоми під час тривалих навантажень. Це має важливе значення як для спортсменів витривалості, так і для осіб, які займаються оздоровчою фізичною активністю [3].

Таким чином, рівень тренуваності є одним із визначальних факторів, що впливають на інтенсивність і ефективність окиснення ліпідів, а також на загальну енергетичну ефективність організму під час фізичного навантаження.

Дослідження ліпідного обміну в умовах фізичного навантаження базується на поєднанні біохімічних, фізіологічних та молекулярних методів, що дозволяють кількісно оцінити швидкість мобілізації, транспорту та окиснення жирних кислот.

Одним із найбільш інформативних сучасних підходів є використання стабільних ізотопних міток (наприклад, ^{13}C або ^2H), які дозволяють безпосередньо визначати швидкість окиснення вільних жирних кислот та інших субстратів *in vivo*. Метод стабільних ізотопних трасерів (Stable Isotope Tracer Method) – це сучасний високоточний метод дослідження метаболізму *in vivo*, який дозволяє кількісно оцінити швидкість синтезу, транспорту, окиснення та утилізації різних субстратів (жирних кислот, глюкози, амінокислот) без порушення їх природного обміну. Суть методу полягає у введенні мічених жирних кислот або глюкози з подальшим аналізом ізотопного складу

видихуваного вуглекислого газу або крові. Це дає змогу точно оцінити внесок різних джерел енергії під час фізичного навантаження [16].

У спортивній біохімії цей метод широко застосовується для визначення швидкості ліполізу, транспорту та β -окиснення жирних кислот, окиснення глюкози, синтезу м'язових білків і оцінки внеску різних енергетичних субстратів під час фізичного навантаження [9]. Наприклад, використання ^{13}C -пальмітату дозволяє кількісно визначити, яка частка енергії під час тривалої роботи забезпечується за рахунок окиснення жирних кислот, а застосування дейтерованої води ($^2\text{H}_2\text{O}$) – оцінити довготривалі адаптаційні зміни білкового та ліпідного обміну в умовах тренувань.

Широко застосовуваним методом для оцінки енергетичного обміну є непряма калориметрія. Вона базується на вимірюванні споживання кисню (VO_2) та виділення вуглекислого газу (VCO_2), що дозволяє визначити дихальний коефіцієнт (RQ).

Значення RQ дає змогу оцінити, який субстрат переважає: $\sim 0,7$ – це жири, а $\sim 1,0$ – вуглеводи. За даними [8], цей метод є ефективним для визначення інтенсивності, при якій досягається максимальне окиснення жирів (Fatmax).

Аналіз концентрації метаболітів у крові є базовим методом оцінки ліпідного обміну. Зокрема визначають рівень вільних жирних кислот (ВЖК); концентрацію триацилгліцеролів; глюкозу та лактат; гормони (інсулін, адреналін). Зміни концентрації ВЖК у плазмі відображають інтенсивність ліполізу та доступність жирів як енергетичного субстрату.

Біопсія скелетних м'язів є одним із найбільш інформативних методів дослідження внутрішньоклітинного енергетичного обміну. Вона дає змогу безпосередньо визначати вміст внутрішньом'язових триацилгліцеролів, активність ферментів β -окиснення, щільність мітохондрій, експресію транспортерів жирних кислот та інші молекулярні маркери метаболічної адаптації. Незважаючи на інвазивний характер, цей метод вважається «золотим стандартом» для вивчення механізмів використання ліпідів у скелетних м'язах під час фізичного навантаження. Сучасні біопсійні дослідження підтверджують, що внутрішньом'язові

триацилгліцероли є важливим джерелом енергії під час тривалої аеробної роботи, а регулярні тренування збільшують їх ефективну мобілізацію та окиснення завдяки зростанню кількості мітохондрій і активності ферментів β -окиснення [5; 7; 12].

Сучасні дослідження дедалі ширше використовують молекулярно-біологічні методи для аналізу експресії генів і білків, що беруть участь у ліпідному обміні, мітохондріальному біогенезі та енергетичному забезпеченні м'язової діяльності. Зокрема, визначають експресію генів транспорту жирних кислот (FAT/CD36, FABPm), карнітин-пальмітоїлтрансферази (CPT1), ферментів β -окиснення та регуляторів мітохондріальної біогенези (PGC-1 α , NRF1, TFAM). Використання методів RT-qPCR, RNA-seq, протеомного аналізу та вестерн-блотингу дає змогу оцінити адаптацію скелетних м'язів до тренувань, дослідити регуляцію енергетичного метаболізму на клітинному рівні та виявити механізми метаболічної гнучкості, що забезпечують ефективне перемикавання між використанням жирів і вуглеводів залежно від інтенсивності фізичного навантаження [4; 5; 7].

Порівняльний аналіз розглянутих методів (див. табл. 1) демонструє, що жоден із них окремо не забезпечує повної характеристики ліпідного обміну під час фізичного навантаження. Найбільш точними для кількісного визначення швидкості метаболічних потоків є стабільні ізотопні трасери, однак їх широке застосування обмежується високою вартістю та складністю аналітичного обладнання. Непряма калориметрія, навпаки, є неінвазивною та придатною для динамічного спостереження під час навантаження, проте дозволяє оцінити лише загальне співвідношення окиснення жирів і вуглеводів без встановлення конкретного джерела жирних кислот. Біохімічний аналіз крові характеризується доступністю, однак зміни концентрації метаболітів не завжди безпосередньо відображають швидкість їх використання м'язовою тканиною. Біопсія та молекулярно-біологічні методи забезпечують найбільш детальну інформацію про внутрішньоклітинні процеси, активність ферментів і механізми адаптації, проте їх обмежують інвазивність, складність та неможливість безперервного моніторингу метаболізму під час

навантаження. Отже, найбільш обґрунтованим є комплексний підхід, поєднання методів різного рівня, що дає змогу

мінімізувати їх окремі методологічні обмеження та підвищити достовірність оцінювання ліпідного обміну.

Таблиця 1

Сучасні методи дослідження ліпідного обміну

Метод	Суть методу	Що визначає	Переваги	Обмеження
Стабільні ізотопні трасери	Введення мічених (^{13}C , ^2H) жирних кислот або глюкози з подальшим аналізом їх окиснення	Швидкість окиснення ВЖК, глюкози, ТГ	Висока точність, прямі вимірювання	Висока вартість, складність
Непряма калориметрія	Вимірювання VO_2 і VCO_2 для розрахунку дихального коефіцієнта	Співвідношення жирів і вуглеводів у енергозабезпеченні	Неінвазивність, доступність	Непрямі оцінки
Біохімічний аналіз крові	Визначення концентрації метаболітів у плазмі	Рівень ВЖК, глюкози, лактату, гормонів	Простота, клінічна доступність	Не відображає внутрішньо-клітинні процеси
Біопсія м'язової тканини	Забір зразків м'язової тканини для аналізу	Вміст ТГ, активність ферментів, мітохондрії	Висока інформативність	Інвазивність
Молекулярно-біологічні методи	Аналіз експресії генів і білків	Регуляція β -окиснення та транспорту жирів	Глибокий клітинний рівень	Потребує складного обладнання

Отже, для комплексного дослідження ліпідного обміну найчастіше застосовується комбінація методів, оскільки кожен із них відображає різні рівні метаболічних процесів – від системного до клітинного. Поєднання цих підходів дозволяє отримати цілісне уявлення про механізми енергозабезпечення та адаптації організму до фізичної активності.

6. ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМКУ

Проведений аналіз сучасних досліджень підтверджує ключову роль окиснення жирних кислот в енергозабезпеченні організму під час тривалої фізичної активності. Інтенсивність використання ліпідів визначається тривалістю та інтенсивністю навантаження, рівнем тренуваності, доступністю енергетичних субстратів, гормональною регуляцією та функціональним станом мітохондрій. Найбільш сприятливі умови для окиснення жирних кислот формуються за навантажень помірної інтенсивності, тоді як зі зростанням інтенсивності збільшується внесок вуглеводів в енергозабезпечення. Систематичні тренування на витривалість посилюють транспорт і β -окиснення жирних кислот, підвищують функціональну активність мітохондрій та сприяють економнішому використанню м'язового

глікогену, формуючи метаболічну гнучкість організму. Водночас значна індивідуальна варіабельність інтенсивності максимального окиснення жирів (Fatmax) свідчить про необхідність персоналізованого підходу до оцінювання метаболічної відповіді на фізичні навантаження.

Порівняння сучасних методів дослідження показало, що найбільш повну характеристику ліпідного обміну забезпечує їх комплексне застосування. Непряма калориметрія дозволяє оцінювати використання енергетичних субстратів на рівні цілісного організму, стабільні ізотопні трасери – кількісно визначати метаболічні потоки, тоді як біопсія та молекулярно-біологічні методи розкривають клітинні й молекулярні механізми адаптації. Водночас відмінності у методичних підходах, протоколах фізичного навантаження та характеристиках досліджуваних груп залишаються однією з причин розбіжностей між результатами окремих досліджень.

Практична значущість отриманих результатів полягає у можливості їх використання фахівцями з фізичної культури і спорту, тренерами, фахівцями з фізичної терапії та реабілітації, спортивної медицини, а також викладачами біохімії, фізіології та дисциплін спортивного профілю. Узагальнені закономірності використання ліпідів можуть бути враховані при обґрунтуванні індивідуальної інтенсивності та тривалості

фізичних навантажень, розробленні програм розвитку витривалості й відновлення фізичної працездатності. Систематизований аналіз методів дослідження може бути використаний науковцями для вибору оптимального комплексу методичних підходів до оцінювання ліпідного та енергетичного обміну.

Перспективи подальших досліджень доцільно пов'язати з експериментальним визначенням індивідуальних особливостей окиснення жирних кислот у представників

різного рівня фізичної підготовленості, віку та статі, а також із дослідженням впливу різних режимів тренування на показники Fatmax і метаболічну гнучкість. Для України особливого значення набувають адаптація сучасних міжнародних методичних протоколів до можливостей вітчизняних лабораторій, формування власних експериментальних баз даних та розроблення персоналізованих підходів до фізичної підготовки, спортивного тренування і реабілітації.

Література

1. Гулай, О. І., Герасимчук, Г. А., & Савчук, С. А. (2025). Інноваційна модель інтеграції освіти й оздоровлення: адаптивний підхід. *Бюлетень Глухівського національного педагогічного університету імені Олександра Довженка. Серія: Педагогічні науки*, 3(59), 25–32. <https://doi.org/10.31376/2410-0897-2025-3-59-25-32>
2. Савчук, С. А., Бакіко, І. В., Файдевич, В. В., & Хомич, А. В. (2026). Методичний підхід до проведення математико-статистичної обробки у спортивних дослідженнях. *Науковий часопис Українського державного університету імені Михайла Драгоманова. Серія 15. Науково-педагогічні проблеми фізичної культури (фізична культура і спорт)*, 6(206), 136–141. [https://doi.org/10.31392/UDU-nc.series15.2026.06\(206\).24](https://doi.org/10.31392/UDU-nc.series15.2026.06(206).24)
3. Brun, J. F., Varlet, E., Myzia, J., Varlet-Marie, E., Raynaud de Mauverger, E., & Mercier, J. (2026). Carbohydrate and Fat Oxidation in Muscle Assessed with Exercise Calorimetry in 6465 Subjects. *Metabolites*, 16(2), 121. <https://doi.org/10.3390/metabol16020121>
4. Granata, C., Jamnick, N. A., & Bishop, D. J. (2018). Principles of exercise prescription, and how they influence exercise-induced changes of transcription factors and other regulators of mitochondrial biogenesis. *Sports Medicine*, 48(7), 1541-1559. <https://doi.org/10.1007/s40279-018-0894-4>
5. Hargreaves, M., & Spriet, L. L. (2020). Skeletal muscle energy metabolism during exercise. *Nature metabolism*, 2(9), 817-828. <https://doi.org/10.1038/s42255-020-0251-4>
6. Hawley, J. A., & Leckey, J. J. (2015). Carbohydrate dependence during prolonged, intense endurance exercise. *Sports Medicine*, 45(Suppl 1), 5-12. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0400-1>
7. Huang, S., Shanguan, R., Chen, S., Lai, X., Han, H., & Sun, J. (2025). Mechanism of fatty acid metabolism and regulation by lactate during exercise in white adipose and skeletal muscle tissue: A review. *Sports Medicine-Open*, 11(1), 76. <https://doi.org/10.1186/s40798-025-00862-5>
8. Jin, J. B., Robinson, A., Soukup, T., Black, E., Abit, A., Hammer, S. M., Han, A., Lucas, E., Kim, Y., & Bae, J. (2025). Metabolic and molecular regulation in skeletal muscle dysfunction and regeneration. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 13, 1651553. <https://doi.org/10.3389/fcell.2025.1651553>
9. Kim, I. Y., Suh, S. H., Lee, I. K., & Wolfe, R. R. (2016). Applications of stable, nonradioactive isotope tracers in in vivo human metabolic research. *Experimental & molecular medicine*, 48(1), e203-e203. <https://doi.org/10.1038/emmm.2015.97>
10. Liu, H., Yang, T., & Choi, S. (2025). Modulation of lipid metabolism by exercise: exploring its potential as a therapeutic target in cancer endocrinology. *Frontiers in Endocrinology*, 16, 1580559. <https://doi.org/10.3389/fendo.2025.1580559>
11. Muscella, A., Stefano, E., Lunetti, P., Capobianco, L., & Marsigliante, S. (2020). The regulation of fat metabolism during aerobic exercise. *Biomolecules*, 10(12), 1699. <https://doi.org/10.3390/biom10121699>
12. Nielsen, J., Christensen, A. E., Nellesmann, B., & Christensen, B. (2017). Lipid droplet size and location in human skeletal muscle fibers are associated with insulin sensitivity. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 313(6), E721-E730. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00062.2017>
13. Rothschild, J. A., Hofmeyr, S., McLaren, S. J., et al. (2025). A novel method to predict carbohydrate and energy expenditure during endurance exercise using measures of training load. *Sports Medicine*, 55, 753–774. <https://doi.org/10.1007/s40279-024-02131-z>
14. Spriet, L. L. (2014). New insights into the interaction of carbohydrate and fat metabolism during exercise. *Sports medicine*, 44(Suppl 1), 87-96. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0154-1>
15. Spriet, L. L. (2022). Anaerobic Metabolism During Exercise. In: McConell, G. (eds) Exercise Metabolism. Physiology in Health and Disease. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94305-9_4
16. Wilkinson, D. J., Brook, M. S., & Smith, K. (2021). Principles of stable isotope research—with special reference to protein metabolism. *Clinical Nutrition Open Science*, 36, 111-125. <https://doi.org/10.1016/j.nutos.2021.02.005>

References

1. Hulai, O., Herasymchuk, H., & Savchuk, S. (2025). An innovative model for integrating education and health improvement: an adaptive approach. *Bulletin of Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv National Pedagogical University . Series: Pedagogical Sciences*, 3(59), 25-32. <https://doi.org/10.31376/2410-0897-2025-3-59-25-32>

2. Savchuk, S., Bakiko, I., Faidevych, V., & Khomych, A. (2026). Methodological approach to mathematical and statistical processing in sports research. *Scientific Journal of the Dragomanov Ukrainian State University. Series 15*, 6(206), 136–141. [https://doi.org/10.31392/UDU-nc.series15.2026.06\(206\).24](https://doi.org/10.31392/UDU-nc.series15.2026.06(206).24)
3. Brun, J. F., Varlet, E., Myzia, J., Varlet-Marie, E., Raynaud de Mauverger, E., & Mercier, J. (2026). Carbohydrate and Fat Oxidation in Muscle Assessed with Exercise Calorimetry in 6465 Subjects. *Metabolites*, 16(2), 121. <https://doi.org/10.3390/metabo16020121>
4. Granata, C., Jamnick, N. A., & Bishop, D. J. (2018). Principles of exercise prescription, and how they influence exercise-induced changes of transcription factors and other regulators of mitochondrial biogenesis. *Sports Medicine*, 48(7), 1541–1559. <https://doi.org/10.1007/s40279-018-0894-4>
5. Hargreaves, M., & Spriet, L. L. (2020). Skeletal muscle energy metabolism during exercise. *Nature metabolism*, 2(9), 817–828. <https://doi.org/10.1038/s42255-020-0251-4>
6. Hawley, J. A., & Leckey, J. J. (2015). Carbohydrate dependence during prolonged, intense endurance exercise. *Sports Medicine*, 45(Suppl 1), 5–12. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0400-1>
7. Huang, S., Shangguan, R., Chen, S., Lai, X., Han, H., & Sun, J. (2025). Mechanism of fatty acid metabolism and regulation by lactate during exercise in white adipose and skeletal muscle tissue: A review. *Sports Medicine-Open*, 11(1), 76. <https://doi.org/10.1186/s40798-025-00862-5>
8. Jin, J. B., Robinson, A., Soukup, T., Black, E., Abit, A., Hammer, S. M., Han, A., Lucas, E., Kim, Y., & Bae, J. (2025). Metabolic and molecular regulation in skeletal muscle dysfunction and regeneration. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 13, 1651553. <https://doi.org/10.3389/fcell.2025.1651553>
9. Kim, I. Y., Suh, S. H., Lee, I. K., & Wolfe, R. R. (2016). Applications of stable, nonradioactive isotope tracers in in vivo human metabolic research. *Experimental & molecular medicine*, 48(1), e203–e203. <https://doi.org/10.1038/emm.2015.97>
10. Liu, H., Yang, T., & Choi, S. (2025). Modulation of lipid metabolism by exercise: exploring its potential as a therapeutic target in cancer endocrinology. *Frontiers in Endocrinology*, 16, 1580559. <https://doi.org/10.3389/fendo.2025.1580559>
11. Muscella, A., Stefano, E., Lunetti, P., Capobianco, L., & Marsigliante, S. (2020). The regulation of fat metabolism during aerobic exercise. *Biomolecules*, 10(12), 1699. <https://doi.org/10.3390/biom10121699>
12. Nielsen, J., Christensen, A. E., Nellesmann, B., & Christensen, B. (2017). Lipid droplet size and location in human skeletal muscle fibers are associated with insulin sensitivity. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 313(6), E721–E730. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00062.2017>
13. Rothschild, J. A., Hofmeyr, S., McLaren, S. J., et al. (2025). A novel method to predict carbohydrate and energy expenditure during endurance exercise using measures of training load. *Sports Medicine*, 55, 753–774. <https://doi.org/10.1007/s40279-024-02131-z>
14. Spriet, L. L. (2014). New insights into the interaction of carbohydrate and fat metabolism during exercise. *Sports medicine*, 44(Suppl 1), 87–96. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0154-1>
15. Spriet, L. L. (2022). Anaerobic Metabolism During Exercise. In: McConell, G. (eds) Exercise Metabolism. Physiology in Health and Disease. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94305-9_4
16. Wilkinson, D. J., Brook, M. S., & Smith, K. (2021). Principles of stable isotope research—with special reference to protein metabolism. *Clinical Nutrition Open Science*, 36, 111–125. <https://doi.org/10.1016/j.nutos.2021.02.005>

Abstract

HULAI Olha, SAVCHUK Serhii
Lutsk National Technical University

LIPID OXIDATION DURING PROLONGED PHYSICAL ACTIVITY: MECHANISM AND CURRENT RESEARCH METHODS

This article analyses current understanding of lipid oxidation as a key mechanism for energy supply to the body during prolonged physical activity. It summarises the findings of recent domestic and international studies on the biochemical mechanisms of mobilisation, transport and β -oxidation of fatty acids during muscular activity. It highlights the characteristics of lipid utilisation depending on the intensity and duration of physical exertion, fitness level and hormonal regulation. It is shown that, under conditions of prolonged physical work, the oxidation of fatty acids ensures the economical utilisation of muscle glycogen stores, maintains a stable energy supply and promotes the development of the body's metabolic flexibility. The role of catecholamines, insulin, glucagon and cortisol in the regulation of lipolysis and lipid oxidation is analysed, as well as the adaptive changes that occur in response to regular training. Particular attention is paid to modern methods of studying lipid metabolism, including the stable isotope tracer method, indirect calorimetry, biochemical blood analysis, skeletal muscle biopsy and molecular biological methods for determining the expression of genes and proteins associated with the transport and oxidation of fatty acids. Their capabilities, advantages and limitations in studying the mechanisms of energy supply during physical exertion are described. It has been established that the integrated application of modern biochemical, physiological and molecular methods enables a comprehensive study of lipid metabolism processes at the systemic, tissue and cellular levels. The results obtained can be used to provide a scientific basis for physical fitness programmes, sports training, medical rehabilitation and a personalised approach to assessing the body's metabolic adaptation to physical exertion.

Keywords: lipid metabolism, energy supply, physical activity, exercise, hormonal regulation, metabolic flexibility, stable isotope tracers, indirect calorimetry, skeletal muscle biopsy, molecular biological methods.