

КВАСНИЦЯ Ірина

Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0003-1718-3301>
 e-mail: irishakvas@gmail.com

КВАСНИЦЯ Олег

Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0003-2478-915X>
 e-mail: oleg.kvasnitsa@ukr.net

ФІЗІОЛОГІЧНІ МАРКЕРИ ВИЗНАЧЕННЯ БІОЛОГІЧНОГО ВІКУ: СУЧАСНІ ПІДХОДИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ

У статті здійснено ґрунтовний аналіз фізіологічних маркерів як інструментів визначення біологічного віку людини. Обґрунтовано актуальність теми, що зумовлена важливістю питання старіння населення, збільшення тривалості життя та необхідністю переходу до персоналізованої функціональної діагностики організму. Розглянуто еволюцію розвитку концепції біологічного віку: від перших спроб його оцінки до сучасних молекулярних та інтегративних підходів, включаючи аналіз епігенетичних годинників і новітніх технологій мультипараметричної оцінки. Наведено класифікацію методів визначення біологічного віку, серед яких виділено клітинні та молекулярні маркери, клінічні біомаркери, функціональні тести та комплексні інтегральні шкали. Особливу увагу приділено фізіологічним маркерам старіння – показникам серцево-судинної, дихальної, опорно-рухової, метаболічної, імунної та гормональної систем. Описано їхні нормативні значення, типові вікові зміни та роль у прогнозуванні стану здоров'я. Проаналізовано практичне застосування фізіологічних маркерів у геронтології для моніторингу процесів старіння і розробки індивідуалізованих стратегій активного довголіття, у клінічній фізіології та медицині – для прогнозування ризиків розвитку серцево-судинних і метаболічних захворювань, у практиці спорту – для оцінки ефективності тренувальних програм, контролю навантаження та запобігання перетренованості, а також у персоналізованій терапії – для індивідуалізації підходів лікування залежно від фактичного фізіологічного стану пацієнта, а не календарного віку. Підкреслено значення фізіологічних маркерів для майбутнього наук про здоров'я, старіння та медицини, їхню роль у створенні нової моделі охорони здоров'я, орієнтованої на превентивний, персоналізований і прогностичний підхід. Зроблено висновок про перспективність подальших досліджень, спрямованих на інтеграцію фізіологічних і когнітивних показників для вдосконалення оцінки біологічного віку та розробки ефективних стратегій уповільнення старіння молодого покоління.

Ключові слова: фізіологічні маркери, біологічний вік, мультипараметрична оцінка, геронтологія, функціональні тести, клінічні біомаркери.

<https://doi.org/10.31891/pcs.2025.2.24>

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

У контексті глобальних демографічних змін, що супроводжуються стрімким зростанням тривалості життя та старінням населення, визначення біологічного віку набуває особливої важливості як у фундаментальній науці, так і в клінічній практиці. На відміну від хронологічного віку, який лише відображає кількість прожитих років, біологічний вік є інтегральним показником функціонального стану організму, що враховує індивідуальні особливості процесів старіння, адаптаційні резерви та ступінь зношення фізіологічних систем. Біологічний вік виявляється більш точним предиктором ризику розвитку

хронічних захворювань, інвалідизації, зниження когнітивних функцій та смертності [1].

За останнє десятиліття в науковій спільноті спостерігається підвищений інтерес до пошуку об'єктивних маркерів старіння, здатних із високою точністю визначати біологічний вік людини [1, 2, 13]. Серед таких маркерів особливе місце посідають фізіологічні показники – доступні, неінвазивні та відносно прості у застосуванні в масових обстеженнях. До фізіологічних маркерів відносять показники функціонування серцево-судинної, дихальної, опорно-рухової, метаболічної та імунної систем, які відображають системний вплив вікових змін на організм.

Паралельно розвиваються технології інтеграції мультипараметричних оцінок,

використання штучного інтелекту для аналізу великих даних та створення персоналізованих прогнозів старіння. Такі інноваційні підходи відкривають нові перспективи у превентивній медицині, геронтології, спортивній фізіології та реабілітаційній практиці. Однак поряд із цим існують серйозні виклики, пов'язані із стандартизацією методів визначення біологічного віку, забезпеченням їх валідності для різних популяцій, а також із вирішенням етичних питань використання біологічного віку у соціальній та економічній сферах [3, 6, 15].

Таким чином, актуальність вивчення фізіологічних маркерів біологічного віку обумовлена не лише науковим інтересом до процесів старіння, а й практичною необхідністю розробки надійних інструментів для оцінки здоров'я, прогнозування тривалості життя та підвищення якості життя населення.

2. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Формуванням уявлення про біологічний вік як окрему характеристику фізіологічного стану людини займалися як вітчизняні так і закордонні науковці. Наукові пошуки у цьому питанні мають кілька ключових етапів – від перших концептуальних напрацювань до сучасних високотехнологічних підходів. Перші спроби розмежувати поняття хронологічного (паспортного) та біологічного віку були здійснені у 1930–1940-х роках. У ході своїх досліджень вчені Штефко В. Г. та Рохлін Д. Г. зосередили увагу на нерівномірності розвитку різних систем організму в однієї і тієї ж особи, що призводило до відмінностей між фактичним віком людини та її фізіологічним станом. Саме тоді термін «біологічний вік» був уперше введений у науковий обіг як характеристика індивідуальної швидкості старіння.

Сучасні дослідження біологічного віку вийшли на новий рівень завдяки розвитку молекулярної біології, генетики та інформаційних технологій. Значущим прикладом є масштабне дослідження Daniel W. Belsky, Avshalom Caspi, Renate Houts, Terrie E. Moffitt (2015), у якому взяло участь 954 особи та проаналізовано 18 різноманітних біомаркерів для оцінки біологічного віку. Результати продемонстрували суттєву

варіабельність біологічного віку серед учасників при однаковому хронологічному віці: від 30 до 45 років при середньому паспортному віці 38 років. Це підтвердило важливість індивідуальної оцінки темпів старіння [4].

На сьогодні біологічний вік визначається через інтегральні індикатори, зокрема епігенетичні зміни (метилування ДНК) [6, 12], стан мітохондріальної ДНК та рівень окисного стресу [3, 11]. Застосування високочутливих біомолекулярних тестів, алгоритмів штучного інтелекту для обробки багатокomпонентних даних значно розширює можливості персоналізованої діагностики та прогнозування процесів старіння [8, 9, 15].

Огляд сучасних досліджень демонструє еволюцію підходів до вирішення означеної проблематики, що проявляється у переході від ізольованого аналізу окремих фізіологічних показників до мультипараметричних інтегративних моделей оцінки біологічного віку, із залученням молекулярних, клінічних та функціональних маркерів.

3. ВИДІЛЕННЯ НЕВИРШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ, КОТРИМ ПРИСВЯЧУЄТЬСЯ ОЗНАЧЕНА СТАТТЯ

Не зважаючи на значний прогрес у вивченні процесів старіння, досі існують суттєві невирішені аспекти, які ускладнюють об'єктивну оцінку біологічного віку. Зокрема, залишається відсутньою уніфікована система критеріїв для вибору фізіологічних маркерів, що використовуються у визначенні біологічного віку людини. Недостатньо розробленими є підходи до комплексної інтеграції клітинних, клінічних і функціональних показників у межах мультипараметричних моделей. Важливою проблемою є також недостатня індивідуалізація оцінки біологічного віку з урахуванням генетичних, фізіологічних та поведінкових особливостей людини. На сьогодні бракує прикладів систематичного застосування фізіологічних маркерів у персоналізованій медицині, спортивній практиці та програмах активного довголіття. Крім того, залишається потреба у глибшому обґрунтуванні прогностичної цінності окремих фізіологічних маркерів щодо ризику розвитку вікових змін та захворювань.

Враховуючи ці виклики, дана стаття присвячена аналізу сучасних фізіологічних маркерів біологічного віку, оцінці їхнього практичного значення та визначенню перспектив їхнього застосування у медичній, геронтологічній та спортивній практиці.

4. ФОРМУВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою даної роботи є системний аналіз сучасних фізіологічних маркерів визначення біологічного віку, оцінка їхньої інформативності та перспектив застосування у медичній, спортивній і науковій практиці.

5. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ З ПОВНИМ ОБҐРУНТУВАННЯМ ОТРИМАНИХ НАУКОВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Старіння є універсальним біологічним процесом, що характеризується поступовим і незворотним зниженням фізіологічних функцій, необхідних для підтримання гомеостазу, виживання та репродуктивної здатності організму. Цей процес розпочинається вже у ранньому дорослому віці і триває протягом усього життєвого циклу, поступово змінюючи морфологічні, функціональні та біохімічні характеристики живих систем. Біологічні основи старіння полягають у накопиченні молекулярних і клітинних пошкоджень, зокрема мутацій ДНК, порушень білкового гомеостазу, дисфункції мітохондрій, хронічного запалення та зниження регенеративних можливостей тканин.

Наслідками цих змін є зниження фізичної витривалості, когнітивних функцій, імунної відповіді та загальної адаптаційної здатності організму. З часом це призводить до зростання ризику розвитку широкого спектру захворювань, таких як серцево-судинні, нейродегенеративні, онкологічні та метаболічні порушення. За прогнозами Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), глобальні демографічні зміни свідчать про швидке старіння населення: очікується, що до 2030 року кожна шоста людина у світі буде старше 60 років, а до 2050 року кількість людей у цій віковій групі подвоїться і досягне 2,1 мільярда. Такі дані акцентують необхідність глибшого розуміння механізмів старіння та пошуку об'єктивних методів оцінки біологічного віку, що дозволить своєчасно виявляти початкові

ознаки вікових змін і розробляти ефективні стратегії їх уповільнення [1, 13].

Важливо підкреслити, що хронологічний вік, який відображає кількість прожитих років, не завжди корелює із фактичним фізіологічним станом людини. У зв'язку з цим у сучасних наукових дослідженнях та клінічній практиці все більше перевагу надають саме біологічному віку як більш точному індикатору здоров'я та тривалості життя [2, 15]. Біологічний вік інтегрує в собі комплекс змін, що накопичуються під впливом генетичних факторів, метаболічних процесів і екологічних впливів, які індивідуально відчуває кожна людина протягом життя.

На відміну від хронологічного віку, біологічний вік відображає реальний стан клітинних і органних систем організму та здатність організму підтримувати гомеостаз у мінливих умовах середовища [1, 2, 13]. Саме тому біологічне старіння розглядають як більш достовірний предиктор ризику розвитку захворювань, функціональних порушень і передчасної смертності. Розуміння і вимірювання біологічного віку відкриває нові можливості для розробки стратегій уповільнення старіння, індивідуалізації профілактичних програм і вдосконалення підходів до оцінки здоров'я на різних етапах життєвого шляху.

Слід зауважити, що сучасні підходи до оцінки біологічного віку ґрунтуються на використанні різних груп маркерів, що відображають глибину та масштаб змін в організмі на молекулярному, клітинному та функціональному рівнях. Умовно всі методи можна класифікувати на чотири основні групи: клітинні та молекулярні маркери, клінічні біомаркери, функціональні тести й інтегральні шкали.

Клітинні та молекулярні маркери включають вимірювання довжини теломер – кінцевих ділянок хромосом, що вкорочуються з кожним циклом поділу клітини. Вкорочення теломер пов'язане зі станом здоров'я і розглядається як один із ключових механізмів клітинного старіння [6, 12]. Іншим молекулярним інструментом є епігенетичні годинники (наприклад, Horvath Clock), що базуються на визначенні рівня метилювання певних ділянок ДНК і корелюють з хронологічним віком людини [8, 9, 10]. Ці методи дозволяють оцінити біологічний вік з

високою точністю навіть у молодих осіб, де функціональні зміни ще не є вираженими.

Клінічні біомаркери охоплюють показники, які можна легко отримати в рамках стандартних медичних обстежень: рівень глюкози натще, ліпідний профіль, артеріальний тиск, індекс маси тіла (ІМТ). Ці маркери відображають метаболічний та серцево-судинний стан організму й мають велику прогностичну цінність щодо оцінки ризику розвитку вікових захворювань [3, 5].

Функціональні тести спрямовані на оцінку фізичних і когнітивних можливостей організму. Серед них найбільш інформативними є тестування легеневої функції (спірометрія), тести на рівновагу,

швидкість ходи, сила хвату, а також когнітивні тести на пам'ять та швидкість обробки інформації. Вони дозволяють визначити фактичний рівень працездатності та адаптаційного потенціалу людини.

Комплексні шкали, такі як шкала GrimAge, епігенетичний годинник (Horvath Clock та PhenoAge), інтегрують дані з різних рівнів оцінки для побудови узагальненого індикатора біологічного віку. Такі моделі дозволяють підвищити точність прогнозування індивідуального старіння, комбінуючи молекулярні, клінічні та функціональні показники в єдину систему [13, 14].

Таблиця 1

Порівняння методів визначення біологічного віку

Група методів	Приклади	Переваги	Обмеження
Клітинні та молекулярні маркери	Довжина теломер, епігенетичні годинники	Забезпечення високої точності вимірювань і чутливості до змін на ранніх етапах старіння	Висока вартість, потреба у проведенні складних лабораторних аналізів
Клінічні біомаркери	Глюкоза крові, артеріальний тиск, ІМТ	Доступність, простота використання. Методи зазвичай економічно вигідні та легко впроваджуються у практику досліджень	Вплив гострих або хронічних станів можуть відображати не тільки вікові зміни, але й тимчасові коливання стану здоров'я
Функціональні тести	Спірометрія, тести на рівновагу, когнітивні тести тощо	Оцінка фактичного функціонального стану дозволяє оцінити реальний рівень працездатності організму	Результати можуть залежати від суб'єктивних чинників, таких як мотивація чи досвід обстежуваного
Комплексні шкали	GrimAge, PhenoAge	Інтеграція різних даних та показників, прогнозування ризиків	Складність розрахунку, необхідність значних масивів даних і ретельної валідації моделей у різних популяціях

Таким чином, методи визначення біологічного віку є різноманітними як за рівнем аналізу (молекулярний, клітинний, функціональний), так і за складністю реалізації та прогностичною цінністю. Кожна група маркерів має свої переваги і обмеження, що визначає доцільність їх застосування залежно від мети дослідження або клінічного завдання. Оптимальним підходом сучасної науки стає інтеграція різноманітних показників у єдині шкали, що дозволяє підвищити точність оцінки біологічного віку та забезпечити більш інформативний прогноз стану здоров'я.

Подальший розвиток технологій та вдосконалення моделей біологічного старіння відкриває перспективи для створення персоналізованих стратегій профілактики

вікових змін і підвищення якості життя населення.

Зауважимо, що фізіологічні маркери відіграють провідну роль у практичній оцінці біологічного віку, оскільки відображають функціональний стан основних систем організму. Вони дозволяють здійснити доступну, відносно швидко та інформативну оцінку старіння на рівні інтегральної відповіді організму. Найбільш інформативними в цьому контексті є показники, що стосуються серцево-судинної, дихальної, опорно-рухової, метаболічної, імунної та гормональної систем.

Серцево-судинна система є однією з перших, яка зазнає вікових змін, тому показники її функціонування мають високу прогностичну цінність. Варіабельність серцевого ритму (HRV) відображає

автономну регуляцію серця і знижується з віком, що є маркером зниження адаптаційного потенціалу. Показники артеріального тиску та частоти серцевих скорочень у стані спокою також прямо пов'язані із ризиком серцево-судинних захворювань і є непрямими індикаторами біологічного віку.

Функціональний стан дихальної системи оцінюють за допомогою спірометрії, зокрема визначення життєвої ємності легень (ЖЄЛ). Поступове зниження ЖЄЛ із віком є об'єктивним критерієм старіння дихальної системи та загального фізіологічного стану організму.

Показники, що відображають стан опорно-рухового апарату, такі як сила м'язів, швидкість ходи та рівновага, використовуються для оцінки фізичної працездатності та ризику розвитку вікової саркопенії й інвалідизації. Зниження цих показників часто асоціюється з підвищенням біологічного віку, незалежно від хронологічного.

Метаболічні маркери, зокрема індекс маси тіла, рівень інсулінорезистентності та ліпідний профіль крові, також тісно пов'язані з процесами старіння. Дисбаланс у метаболічній системі сприяє розвитку атеросклерозу, діабету 2 типу та інших вікових патологій, що безпосередньо впливає на збільшення біологічного віку.

Стан імунної системи оцінюють за допомогою таких показників, як рівень С-реактивного білка (СРБ) та інтерлейкінів. З віком спостерігається явище «іммунного старіння», що проявляється хронічним низькорівневим запаленням і зниженням ефективності імунної відповіді.

Гормональний баланс також є важливим маркером старіння. Зниження рівнів дегідроепіандростерон-сульфату (DHEA-S), мелатоніну та гормону росту корелює з віковими змінами у метаболізмі, репарації тканин та регуляції сну. Вимірювання цих показників дозволяє додатково оцінити ендокринний аспект біологічного старіння.

Таким чином, фізіологічні маркери забезпечують багатогранну характеристику функціонального стану організму і можуть бути використані як самостійно, так і в комбінації для підвищення точності оцінки біологічного віку (табл. 2).

Наведені у таблиці фізіологічні маркери демонструють, що процеси старіння мають мультисистемний характер і супроводжуються поступовими змінами у різних функціональних системах організму. Зниження варіабельності серцевого ритму, життєвої ємності легень, сили м'язів, а також погіршення метаболічних та імунологічних показників є ключовими ознаками збільшення біологічного віку. Наявність чітких референтних меж дозволяє здійснювати кількісну оцінку ступеня старіння та використовувати ці маркери для прогнозування ризику вікових змін та захворювань. Використання комплексної оцінки, що поєднує дані з декількох систем, підвищує точність визначення біологічного віку і дозволяє персоналізувати підходи до профілактики та лікування вікових змін.

Важливим є те, що фізіологічні маркери біологічного віку знаходять широке практичне застосування в різних галузях медицини, спортивної науки та персоналізованої терапії. Їх використання дозволяє більш точно оцінювати функціональний стан організму, розробляти індивідуальні стратегії профілактики та лікування, а також сприяти продовженню активного довголіття.

У геронтології фізіологічні маркери є важливим інструментом для моніторингу процесів старіння. Регулярна оцінка показників серцево-судинної, дихальної, метаболічної та імунної систем дозволяє виявляти ранні ознаки прискореного старіння та своєчасно втручатися у цей процес. Завдяки використанню фізіологічних тестів можна індивідуалізувати профілактичні заходи, зокрема програми фізичної активності, дієтотерапію та гормональну підтримку, що сприяє подовженню періоду активного довголіття та збереженню якості життя у старшому віці.

У клінічній медицині такі маркери слугують основою для прогнозування ризиків розвитку серцево-судинних, метаболічних та інших вікових захворювань. Показники, такі як артеріальний тиск, рівень глюкози в крові, індекс маси тіла, рівень С-реактивного білка та функціональна ємність легень, дозволяють виявити осіб із підвищеним ризиком ще до появи клінічних симптомів. Це відкриває можливості для раннього втручання та персоналізованого планування лікувальних

стратегій, спрямованих на попередження розвитку патологічних процесів.

У спортивній практиці застосування фізіологічних маркерів дозволяє об'єктивно оцінювати ефективність тренувальних програм, моніторити відновлення спортсменів та запобігати ризику перетренованості. Такі показники, як варіабельність серцевого ритму, м'язова сила, швидкість ходи та рівновага, є важливими для визначення рівня фізичної підготовленості та адаптації до фізичних навантажень. Регулярний моніторинг цих параметрів допомагає оптимізувати тренувальні процеси та впливати на зниження ризику травматизму та перевантаження.

У сфері персоналізованої терапії фізіологічні маркери відіграють ключову роль у підборі індивідуальних схем лікування, орієнтованих не на календарний вік пацієнта, а на його фактичний фізіологічний стан. Завдяки оцінці функціональних можливостей організму можна більш точно визначати доцільність тих чи інших лікувальних заходів, коригувати дози медикаментів, планувати реабілітаційні заходи та прогнозувати результати терапії.

Відповідно, застосування фізіологічних маркерів біологічного віку забезпечує можливість переходу до нової моделі охорони здоров'я, орієнтованої на профілактику, раннє втручання та індивідуалізований підхід до підтримки здоров'я та якості життя.

Таблиця 2

Основні фізіологічні маркери біологічного віку та їхні вікові зміни

Система	Маркер	Норма показника у дорослих	Типові вікові зміни
Серцево-судинна система	Варіабельність серцевого ритму (HRV)	> 50 мс (SDNN)	Зниження до < 30 мс
	Артеріальний тиск	120/80 мм рт. ст.	Підвищення до 140/90 мм рт. ст. і вище
	Частота серцевих скорочень у спокої	60–75 уд./хв	Підвищення понад 80 уд./хв
Дихальна система	Життєва ємність легень (ЖЄЛ)	4,0–5,5 л (для чоловіків), 3,0–4,5 л (для жінок)	Зниження на 25–30% після 60 років
Опорно-руховий апарат	Сила хвату	> 40 кг (чоловіки), > 25 кг (жінки)	Зниження на 20–40% у старшому віці
	Швидкість ходи	> 1,0–1,2 м/с	Зменшення до < 0,8 м/с
	Тест на рівновагу (стоячи на одній нозі)	> 30 с	Скорочення до < 10–15 с
Метаболічна система	Індекс маси тіла (ІМТ)	18,5–24,9 кг/м ²	Підвищення або ризик ожиріння
	Інсулінорезистентність (НОМА-IR)	< 2,0–2,5	Підвищення ризику до > 3,0
	Ліпідний профіль	< 3,0 ммоль/л	Підвищення вище 3,4–3,7 ммоль/л
Імунна система	С-реактивний білок (СРБ)	< 1,0 мг/л	Підвищення хронічного рівня до 3,0–5,0 мг/л
	Інтерлейкін-6 (ІЛ-6)	< 1,5 пг/мл	Підвищення в 2–3 рази
Гормональна система	DHEA-S	7–10 мкмоль/л (молоді)	Зниження на 50–70% після 60 років
	Мелатонін (нічний рівень)	50–70 пг/мл	Зниження вдвічі або більше
	Гормон росту (GH)	Пікові секреції 5–20 нг/мл	Різка зменшення після 30–40 років

Примітка: показники можуть децю варіювати залежно від статі, етнічної групи та рівня фізичної активності.

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

У результаті проведеного аналізу встановлено, що фізіологічні маркери є

важливими та інформативними інструментами для оцінки біологічного віку людини. Класифікація методів визначення біологічного віку, що охоплює клітинні та молекулярні маркери, клінічні біомаркери,

функціональні тести та інтегральні шкали, відображає складність та багаторівневість процесів старіння. Серед фізіологічних маркерів особливе значення мають показники функціонування серцево-судинної, дихальної, опорно-рухової, метаболічної, імунної та гормональної систем, оскільки саме вони найкраще відображають реальний стан здоров'я та адаптаційного потенціалу організму.

Практичне застосування фізіологічних маркерів є надзвичайно широким і охоплює геронтологію, клінічну медицину, спортивну

медицину та персоналізовану терапію. Вони дозволяють здійснювати моніторинг процесів старіння, прогнозувати ризики розвитку вікових захворювань, оцінювати ефективність тренувальних програм та адаптувати лікувальні стратегії відповідно до фізіологічного, а не лише хронологічного віку пацієнта. Інтеграція фізіологічних маркерів біологічного віку у клінічну практику сприятиме переходу до більш превентивної, персоналізованої та прогностичної науки про здоров'я, орієнтованої на збереження функціонального резерву організму.

Література

1. Кашуба, М., Мельник, Н., & Сопель, М. (2022). Біологічний вік як критерій оцінки ризику смертності та захворюваності. *Ukrainian Journal of Occupational Health*, 2022, 18 (3), 189–196. Режим доступу: <https://doi.org/10.33573/ujoh2022.03.189>
2. Писарук, А., Шатило, В., Антонюк-Щеглова І., та ін. (2023). Біологічний вік людини: регресійна та нейромережна моделі. *Фізіологічний журнал*, 69(2), 3–10. Режим доступу: https://fz.kiev.ua/journals/2023_V.69/2/FiziolZh-2_2023-3-10.pdf
3. Anakor, E., Le, Gall L., Dumonceaux, J., Duddy, W. J., & Duguez, S. (2021). Exosomes in ageing and motor neurone disease: biogenesis, uptake mechanisms, modifications in disease and uses in the development of biomarkers and therapeutics. *Cells* 10 (11), 2930. URL: <https://doi.org/10.3390/cells10112930>
4. Belsky, D. W., Caspi, A., Houts, R., & Moffitt T. E. (2015). Quantification of biological aging in young adults. *PNAS*. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1506264112>
5. Beltrán-Sánchez, H., Palloni, A., Huangfu, Y., & McEniry, M. C. (2022). Modeling biological age and its link with the aging process. *PNAS Nexus* 1 (3), 135. URL: <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgac135>
6. Cheng-Yong Tham, LaiFong Poon, TingDong Yan & Javier Yu Peng Koh (2023). High-throughput telomere length measurement at nucleotide resolution using the PacBio high fidelity sequencing platform. *Nature Communications*, V. 14, 281. URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-023-35823-7>
7. Hoshino, A., Horvath, S., Sridhar, A., Chitsazan, A., & Reh, N. A/ (2019). Synchrony and asynchrony between an epigenetic clock and developmental timing. *Scientific Reports*, V. 9, 3770. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-39919-3>
8. Huang, W., Hickson, L. J., Eirin, A., Kirkland, J. L., & Lerman, L. O. (2022). Cellular senescence: the good, the bad and the unknown. *Nat. Rev. Nephrol.* 18 (10), 611–627. DOI: [10.1038/s41581-022-00601-z](https://doi.org/10.1038/s41581-022-00601-z)
9. Kabacik, S., Lowe, D., Fransen, L., Leonard, M., Ang, S.-L., Whiteman, C., et al. (2022). The relationship between epigenetic age and the hallmarks of aging in human cells. *Nat. Aging* 2 (6), 484–493. DOI: [10.1038/s43587-022-00220-0](https://doi.org/10.1038/s43587-022-00220-0)
10. Kerepesi, C., Zhang, B., Lee, Sang-Goo, Trapp, A., & Gladyshev, V. (2021). Epigenetic clocks reveal a rejuvenation event during embryogenesis followed by aging. DOI: <https://doi.org/10.1101/2021.03.11.435028>
11. Lai, T. P., Wright, W. E., & Shay, J. W. (2018). Comparison of telomere length measurement methods. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 373:20160451. DOI: [10.1098/rstb.2016.0451](https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0451)
12. Ledda, C., Loreto, C., & Rapisarda, V. (2020). Telomere length as a biomarker of biological aging in shift workers. *Appl. Sci.* 10 (8), 2764. URL: <https://doi.org/10.3390/app10082764>
13. Mathur, A., Taurin, S., & Alshammmary, S. (2024). New insights into methods to measure biological age: a literature review. *Frontiers: Sec. Genetics, Genomics and Epigenomics of Aging*. DOI: [10.3389/fragi.2024.1395649](https://doi.org/10.3389/fragi.2024.1395649)
14. McCrory, C., Fiorito, G., & Hernandez, B. (2020). GrimAge Outperforms Other Epigenetic Clocks in the Prediction of Age-Related Clinical Phenotypes and All-Cause Mortality. *The Journals Of Gerontology*, V. 76 (5), 741–749. DOI: [10.1093/gerona/glaa286](https://doi.org/10.1093/gerona/glaa286)
15. Yoo, J., Hur J., Yoo, J., Jurivich, D., & Le, K.J (2024). A novel approach to quantifying individual's biological aging using Korea's national health screening program toward precision public health. *Springer Nature Link*, V. 46, 3387–3403.

Reference

1. Kashuba, M., Melnyk, N., & Sopol, M. (2022). Biolohichniy vik yak kryterii otsinky ryzyku smertnosti ta zakhvoriuvanosti. *Ukrainian Journal of Occupational Health*, 2022, 18 (3), 189–196. URL: <https://doi.org/10.33573/ujoh2022.03.189>
2. Pysaruk, A., Shatylo, V., Antoniuk-Shechhlova I., та ін. (2023). Biolohichniy vik liudyny: rehresiina ta neiromerezhna modeli. *Fiziolohichniy zhurnal*, 69(2), 3–10. URL: https://fz.kiev.ua/journals/2023_V.69/2/FiziolZh-2_2023-3-10.pdf

3. Anakor, E., Le, Gall L., Dumonceaux, J., Duddy, W. J., & Duguez, S. (2021). Exosomes in ageing and motor neurone disease: biogenesis, uptake mechanisms, modifications in disease and uses in the development of biomarkers and therapeutics. *Cells* 10 (11), 2930. URL: <https://doi.org/10.3390/cells10112930>
4. Belsky, D. W., Caspi, A., Houts, R., & Moffitt T. E. (2015). Quantification of biological aging in young adults. *PNAS*. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1506264112>
5. Beltrán-Sánchez, H., Palloni, A., Huangfu, Y., & McEniry, M. C. (2022). Modeling biological age and its link with the aging process. *PNAS Nexus* 1 (3), 135. URL: <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgac135>
6. Cheng-Yong Tham, LaiFong Poon, TingDong Yan & Javier Yu Peng Koh (2023). High-throughput telomere length measurement at nucleotide resolution using the PacBio high fidelity sequencing platform. *Nature Communications*, V. 14, 281. URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-023-35823-7>
7. Hoshino, A., Horvath, S., Sridhar, A., Chitsazan, A., & Reh, N. A/ (2019). Synchrony and asynchrony between an epigenetic clock and developmental timing. *Scientific Reports*, V. 9, 3770. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-39919-3>
8. Huang, W., Hickson, L. J., Eirin, A., Kirkland, J. L., & Lerman, L. O. (2022). Cellular senescence: the good, the bad and the unknown. *Nat. Rev. Nephrol.* 18 (10), 611–627. DOI: [10.1038/s41581-022-00601-z](https://doi.org/10.1038/s41581-022-00601-z)
9. Kabacik, S., Lowe, D., Fransen, L., Leonard, M., Ang, S.-L., Whiteman, C., et al. (2022). The relationship between epigenetic age and the hallmarks of aging in human cells. *Nat. Aging* 2 (6), 484–493. DOI: [10.1038/s43587-022-00220-0](https://doi.org/10.1038/s43587-022-00220-0)
10. Kerepesi, C., Zhang, B., Lee, Sang-Goo, Trapp, A., & Gladyshev, V. (2021). Epigenetic clocks reveal a rejuvenation event during embryogenesis followed by aging. DOI: <https://doi.org/10.1101/2021.03.11.435028>
11. Lai, T. P., Wright, W. E., & Shay, J. W. (2018). Comparison of telomere length measurement methods. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 373:20160451. DOI: [10.1098/rstb.2016.0451](https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0451)
12. Ledda, C., Loreto, C., & Rapisarda, V. (2020). Telomere length as a biomarker of biological aging in shift workers. *Appl. Sci.* 10 (8), 2764. URL: <https://doi.org/10.3390/app10082764>
13. Mathur, A., Taurin, S., & Alshammary, S. (2024). New insights into methods to measure biological age: a literature review. *Frontiers: Sec. Genetics, Genomics and Epigenomics of Aging*. DOI: [10.3389/fragi.2024.1395649](https://doi.org/10.3389/fragi.2024.1395649)
14. McCrory, C., Fiorito, G., & Hernandez, B. (2020). GrimAge Outperforms Other Epigenetic Clocks in the Prediction of Age-Related Clinical Phenotypes and All-Cause Mortality. *The Journals Of Gerontology*, V. 76 (5), 741–749. DOI: [10.1093/gerona/glaa286](https://doi.org/10.1093/gerona/glaa286)
15. Yoo, J., Hur J., Yoo, J., Jurivich, D., & Le, K.J (2024). A novel approach to quantifying individual's biological aging using Korea's national health screening program toward precision public health. *Springer Nature Link*, V. 46, 3387–3403.

Abstract

KVASNYTSIA Iryna, KVASNYTSYA Oleh
Khmelnyskyi National University

PHYSIOLOGICAL MARKERS TO DETERMINE BIOLOGICAL AGE: MODERN APPROACHES AND PROSPECTS OF USE

The article presents a comprehensive analysis of physiological markers as instruments for determining an individual's biological age. The significance of the topic has been substantiated by the growing concern over population aging, increased life expectancy, and the pressing need to transition toward personalized preventive medicine. The development of the concept of biological age has been examined, tracing its progression from early assessment attempts to contemporary molecular and integrative approaches, including the study of epigenetic clocks (mathematically derived indicators of biological age) and cutting-edge technologies for multiparametric evaluation. A classification of existing methods for assessing biological age has been provided, encompassing cellular and molecular markers, clinical biomarkers, functional assessments, and complex integrative scales. Particular emphasis has been placed on physiological markers of aging – parameters reflecting the condition of the cardiovascular, respiratory, musculoskeletal, metabolic, immune, and endocrine systems. Normative values, typical age-related changes, and the prognostic relevance of these markers for health outcomes have been outlined. The practical applications of physiological markers have been studied across various domains: in gerontology, for monitoring the aging process and formulating individualized strategies for active longevity; in clinical medicine, for predicting risks of cardiovascular and metabolic diseases; in sports science, for evaluating training efficacy, managing physical load, and preventing overtraining; and in personalized medicine, for tailoring therapeutic interventions based on an individual's physiological condition rather than chronological age. The article emphasizes the critical role of physiological markers in the future development of health sciences, aging research, and medical practice, highlighting their contribution to the establishment of a healthcare model centered on preventive, personalized, and predictive principles. It concludes by emphasizing the potential of further research integrating physiological and cognitive indicators to enhance biological age assessment and to devise effective strategies for mitigating aging processes, particularly among younger populations.

Key words: physiological markers, biological age, multiparametric evaluation, gerontology, functional assessments, clinical biomarkers.

Стаття надійшла до редакції / Received 23.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 07.06.2025