

УДК 616:575:004

DOI: <https://doi.org/10.11603/mie.1996-1960.2025.1-2.15987>

## ПРЕДИКТИВНА І ПРЕЦИЗІЙНА МЕДИЦИНА: НОВІ ГОРИЗОНТИ В ОЦІНЦІ ЗДОРОВ'Я ТА ПРОГНОЗУВАННІ ПАТОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

О. П. Мінцер, Ю. В. Вороненко

*Національний університет охорони здоров'я імені П. Л. Шупика*

У статті розглянуто сучасні концепції розвитку предиктивної, прецизійної та профілактичної медицини як нової парадигми організації системи охорони здоров'я. Проаналізовано еволюцію підходів до оцінки стану здоров'я людини – від реактивної моделі лікування до проактивної, орієнтованої на раннє виявлення ризиків та прогнозування патологічних процесів. Показано, що сучасні біомедичні технології, зокрема геномне секвенування, протеоміка, аналіз великих масивів медичних даних, а також використання персональних переносних (сенсорних) пристроїв, систем дистанційного моніторингу та Інтернету речей, формують нові можливості для індивідуалізованої оцінки здоров'я та персоналізованого лікування.

Окрему увагу приділено проблемам повноти та якості медичних даних, зокрема пропущеним результатам лабораторних досліджень, що можуть суттєво впливати на точність клінічних висновків і прогностичних моделей. Розглянуто методи статистичної та алгоритмічної імпутації даних, а також роль систем підтримки прийняття клінічних рішень на основі штучного інтелекту.

Обґрунтовано, що інтеграція біомедичних технологій, цифрових інструментів моніторингу та методів математичного моделювання сприяє формуванню нових стратегій управління здоров'ям населення. Підкреслено необхідність розвитку відкритих інформаційних систем охорони здоров'я, підготовки медичних фахівців до роботи з великими даними та забезпечення етичного використання персоналізованої медичної інформації.

**Ключові слова:** предиктивна медицина; прецизійна медицина; профілактична медицина; оцінка здоров'я; прогнозування патологічних процесів; персональні переносні пристрої; імпутація даних; штучний інтелект; великі дані.

## PREDICTIVE AND PRECISION MEDICINE: NEW HORIZONS IN HEALTH ASSESSMENT AND PREDICTION OF PATHOLOGICAL PROCESSES

O. P. Mintser, Yu. V. Voronenko

*Shupyk National Healthcare University of Ukraine*

**Background.** Modern healthcare systems are undergoing a significant transformation driven by the development of predictive, precision, preventive, and personalized medicine. These approaches represent a transition from a traditional reactive model of healthcare to a proactive model focused on early risk detection, disease prevention, and individualized treatment strategies based on biological and behavioral characteristics of patients.

**Materials and Methods.** The study was conducted using analytical review and synthesis of contemporary scientific literature devoted to predictive, precision, and preventive medicine. Particular attention was given to the role of biomedical technologies, wearable medical devices,

digital health systems, and artificial intelligence in health assessment and prediction of pathological processes. The analysis also considered challenges related to data completeness, missing laboratory results, and statistical and machine-learning approaches to data imputation.

**Results.** The findings indicate that modern biomedical technologies, including genomic sequencing, proteomics, big data analytics, wearable sensors, and Internet of Things technologies, provide new opportunities for individualized health monitoring and early detection of pathological processes. Wearable medical devices enable continuous physiological monitoring, screening, and detection of deviations from normal parameters. However, the increasing use of digital medical technologies generates significant challenges associated with data quality, missing values in clinical datasets, and the need for reliable statistical and algorithmic imputation methods. In addition, the rapid development of artificial intelligence and digital health infrastructures raises important ethical, organizational, and technological issues, including data confidentiality, interoperability, and healthcare inequality.

**Conclusions.** Predictive and precision medicine represent an emerging paradigm of healthcare that integrates biomedical technologies, digital monitoring systems, and mathematical modeling to improve health assessment and disease prediction. Future research should focus on improving methods for individualized patient characterization, developing reliable predictive models, ensuring data quality, and creating open and ethically responsible healthcare information systems. Effective implementation of these strategies also requires improved training of healthcare professionals and the development of interdisciplinary approaches combining medicine, data science, and digital technologies.

**Key words:** predictive medicine; precision medicine; preventive medicine; health assessment; prediction of pathological processes; personal wearable devices; data imputation; artificial intelligence; big data.

**Вступ.** Нові стратегічні парадигми розвитку охорони здоров'я формуються чи не щорічно. Предиктивна медицина, прецизійна медицина, профілактична медицина, персоналізована медицина, стратифікована медицина – це назви нової стратегії медицини, яка долає обмеження універсального підходу до фармакотерапії, ґрунтуючись на специфічних генетичних характеристиках конкретної людини [1,2]. Хоча ці терміни іноді використовуються як синонімічні, вони відображають важливі концептуальні відмінності. Поступова зміна значення цих термінів протягом останніх десятиліть може призводити до різних їх трактувань і певних труднощів у чіткому розмежуванні, навіть серед медичних фахівців. У науковій літературі вони нерідко використовуються в різних контекстах, що потребує більш точного визначення їх змісту та сфери застосування.

До того ж, нещодавні технологічні досягнення, зокрема поява нових медичних пристроїв, значно розширюють можливості застосування цих підходів у медичній практиці. І хоча дискусії тривають, безперечним залишається факт: нові стратегії медицини – це підхід заснований на розумінні відмінностей між пацієнтами з тим самим захворюванням і відхід від концепції «один розмір підходить усім». Відповідно до цієї концепції, адекватні методи лікування мають підбиратися для конкретних груп пацієнтів [3].

**Мета дослідження:** проведення аналітичного огляду сучасних підходів у сфері персоналізованої, предиктивної, прецизійної та профілактичної медицини.

**Матеріал і методи дослідження.** Дослідження виконано з використанням методів системного та порівняльного аналізу сучасних наукових

публікацій, присвячених розвитку предиктивної, прецизійної та профілактичної медицини. Матеріалами слугували результати систематичних оглядів, метааналізів і наукових досліджень, що висвітлюють використання геномних технологій, біомаркерів, персональних переносних пристроїв, систем дистанційного моніторингу та алгоритмів машинного навчання для оцінки стану здоров'я і прогнозування патологічних процесів. Узагальнення результатів здійснювалося з позицій міждисциплінарного підходу з оцінкою потенціалу інтеграції біомедичних технологій, цифрових систем моніторингу та математичного моделювання у сучасні стратегії персоналізованої медицини.

**Результати та їх обговорення.** У сучасній медицині формується концепція медицини P5, яка характеризується міждисциплінарністю, а в окремих випадках навіть міжгалузєвою інтеграцією та надає дослідникам і клініцистам широкий обсяг знань у галузі лікування захворювань. Можливість визначення генетичної схильності у поєднанні з оцінкою способу життя та факторів навколишнього середовища може підвищити ефективність діагностики і терапії у пацієнтів, які страждають на відповідні захворювання.

Зокрема, одним з перших виникло поняття профілактичної медицини. Ще в минулому сторіччі профілактичну медицину визначали як напрям медицини, метою якого є забезпечення відсутності хвороби шляхом запобігання її виникненню або зупинення розвитку захворювання та попередження подальших ускладнень. Профілактична медицина може здійснюватися відповідними державними установами, лікарями первинної ланки та самими пацієнтами [4]. Слід звернути увагу, що вже у той час також розглядалося ключове завдання профілактичної медицини – мотивувати людину до самостійної профілактики, при цьому підкреслювалися можливі способи досягнення такої мотивації, більшість з яких потребують активної участі лікаря первинної ланки.

Розрізняють три види профілактики: первинна, вторинна і третинна. Первинна профілактика спрямована на недопущення виникнення захворювань. Крім того, первинну профілактику диференціюють на два види: суспільна та індивідуальна, причому часто вони доповнюють одна одну. Заходи суспільної профілактики охоплюють усе або більшу частину населення, оскільки мета такої профілактики – знизити ризик розвитку захворювань у цілому. Прикладом суспільної профілактики є вакцинація дітей та дорослих, інформування населення про вплив шкідливих звичок на організм людини або про важливість підтримки здорового способу життя тощо. Завдання ж індивідуальної профілактики полягає у попередженні захворювань серед груп ризику (зокрема, серед осіб, які курять, вживають наркотичні засоби, зловживають алкоголем або мають надмірне споживання їжі). Вторинна профілактика спрямована на раннє виявлення та подальше лікування відповідної хвороби ще на доклінічній стадії. Її основою є раннє виявлення захворювань за допомогою проведення скринінгових досліджень (обстеження молочних залоз, тест на фенілкетонурию, електрокардіографія тощо). Для ефективної вторинної профілактики необхідні ефективні засоби і методи діагностики, доступність медичної допомоги для всього населення, оснащення закладів охорони здоров'я необхідним медичним обладнанням та технологіями. Третинна профілактика – це заходи, спрямовані на попередження розвитку ускладнень та погіршення перебігу хвороби, а також динамічне спостереження за пацієнтами з метою запобігання таким небажаним наслідкам захворювання, як смерть, інвалідність, перехід захворювання у хронічну форму. Узагальнюючи, слід зазначити, що профілактична медицина – це спеціалізована галузь охорони здоров'я, зосереджена на запобіганні хворобам, інвалідності та смерті за допомогою проактивних стратегій, орієнтованих на пацієнта та громаду. Лікарі цієї галузі, а також фахівці з епідеміології та поведінкових наук використовують скринінгові дослідження,

вакцинацію, консультування щодо способу життя та організаційні заходи у сфері охорони здоров'я для мінімізації ризиків захворювань і покращення якості життя людини [5,6].

У подальшому з'явилися дослідження, присвячені прецизійній медицині. Остання (також відома як персоналізована, прицільна або індивідуалізована) відображає сучасний підхід, що передбачає адаптацію діагностики, профілактики та лікування захворювань до індивідуальних особливостей кожного пацієнта, зокрема з урахуванням його генетичних, молекулярних, клітинних та екологічних факторів з метою більш точного й ефективного втручання, на відміну від універсального підходу. Це дає змогу точніше прогнозувати ризики та визначати найбільш ефективні лікарські засоби і стратегії лікування.

Така парадигма адаптує діагностику та лікування на основі унікального генетичного, молекулярного та екологічного профілю кожного пацієнта, використовуючи передові технології, такі як омікс-профілювання, методи візуалізації та аналіз даних на основі штучного інтелекту (далі – ШІ). Це знижує залежність від підходу «проб і помилок» при призначенні лікарських засобів, мінімізує побічні ефекти та підвищує загальну ефективність лікування. У результаті формується більш точна таксономія захворювань, яка краще відображає їхню базову патологію, зокрема при таких хворобах, як рак, хвороба Альцгеймера та різні хронічні захворювання. Крім того, накопичуються терапевтичні дані, що сприяють розробці таргетних методів лікування.

Фактично, застосовується інноваційна парадигма, що завершує послідовність розвитку підходів – від стохастичних методів прийняття рішень до медичних стандартів і протоколів та, зрештою, до індивідуалізованої медицини. Основою прецизійної медицини є геномні дослідження.

Предиктивна медицина використовує інформацію, що надається персональною геномікою, для вибору медичних процедур для конкретної людини і ґрунтується на «новій систематичності» людських захворювань, що, своєю

чергою, базується на молекулярній біології. Таким чином, прогностична медицина – це галузь медицини, спрямована на попередження захворювань, до яких люди мають генетичну схильність, а також, за необхідності, на запобігання передачі генетичної сприйнятливості майбутнім поколінням.

У науковій літературі поширеною є думка, що ключовим фактором, який відрізняє превентивну медицину від профілактичної є її призначення. Превентивна медицина виявляє зміни, здатні призвести до захворювань, і обґрунтовує цільові заходи, спрямовані на їх запобігання та поліпшення стану здоров'я окремого індивіда (персоніфікована превентивна медицина) або певної популяції (суспільства). Основною складовою профілактичної медицини є виявлення захворювань у групах населення на ранніх стадіях. Водночас слід зазначити, що стадії, на яких більшість захворювань можуть бути діагностовані в межах вторинної профілактики за допомогою таких доступних методів, як лабораторні дослідження, рентгенографія, ультразвукове дослідження тощо, фактично не є ранніми. Переважно, захворювання вдається виявити на доклінічних стадіях, коли відповідні клінічні симптоми ще відсутні. Водночас профілактична медицина переважно не є персоніфікованою: рекомендації щодо запобігання виникненню (первинна профілактика) або прогресуванню захворювань здебільшого мають універсальний характер і є однаковими для більшості людей (фізична активність, раціональне харчування тощо).

Основною складовою профілактичної медицини є виявлення захворювань у групах населення на ранніх стадіях. Водночас слід зазначити, що стадії, на яких більшість захворювань можуть бути діагностовані в межах вторинної профілактики за допомогою таких доступних методів, як лабораторні дослідження, рентгенографія, ультразвукове дослідження тощо, фактично не є ранніми.

У кращому випадку, вдається діагностувати їх на доклінічних стадіях (коли ще немає

симптомів). Профілактична медицина не персоніфікована в цілому, тобто рекомендації щодо запобігання розвитку (первинна профілактика) або прогресування захворювань однакові для всіх (фізкультура та спорт, правильне харчування). Превентивна медицина, завдяки сучасним технологіям, дозволяє передбачати саму можливість розвитку того чи іншого захворювання в окремої людини і вжити відповідних саме для неї заходів, спрямованих на запобігання розвитку відповідного захворювання. Таким чином, превентивна медицина – це принципово нова ідеологія медичної практики, що набула свого розвитку на основі революційних досліджень у галузі молекулярної генетики, молекулярної біології, біостатистики, біоінженерії. Крім того, превентивна медицина – це можливість не тільки виявити хвороби на доклінічній стадії, а й на основі аналізу геному прогнозувати схильність до них. Крім того, створюються можливості для здійснення конкретних заходів, спрямованих на запобігання розвитку захворювань, ефективних для кожної окремої людини. У такому випадку лікар може надавати пацієнту індивідуалізовані рекомендації щодо харчування, вживання вітамінів, застосування санаторно-курортних процедур, а також щодо вибору оптимальних видів фізичної активності. Варто зауважити, що деякі продукти, які традиційно вважаються корисними, для осіб із певними особливостями функціонування ферментних систем можуть бути шкідливими, тоді як загальноприйнятні види фізичних навантажень – недостатньо ефективними.

Зрештою, у лікаря виникає можливість обґрунтувати пацієнту, чому для останнього критично важливо відмовитися від шкідливої звички. Таким чином, превентивна медицина робить немедикаментозне лікування значно ефективнішим. У випадку, коли мова йде про ранню діагностику захворювань за допомогою біомаркерів, підхід превентивної медицини дозволяє зробити лікарське лікування не лише ефективнішим, а й безпечнішим. Разом з тим сучасне медикаментозне лікування полягає у тому, що по-перше, як правило, ефективні лікарські

засоби, мають виражені побічні ефекти; по-друге, вони є ефективними далеко не для всіх пацієнтів. Під час клінічних випробувань лікарських засобів використовують показник *number needed to treat* – кількість пацієнтів, яких необхідно пролікувати, щоб досягти позитивного результату в одного з них. У зв'язку з цим сучасні медичні технології дедалі більше орієнтуються на створення таргетної терапії, що діє вибірково та селективно.

За останні роки, часто використовується поняття «персоналізована (індивідуалізована) медицина». На сьогодні, найбільш відповідною дефініцією персоналізованої медицини слід визначити наступну: використання об'єднаних знань (генетичних чи інших) про людину для прогнозування схильності до відповідних захворювань, прогнозування захворювання чи реакції на лікування з метою покращення стану здоров'я цієї людини. Зауважимо, що персоналізована медицина може бути повністю реалізована лише в проактивній моделі охорони здоров'я, де на основі оцінки ризиків виникнення захворювань та належного планування профілактичних заходів формується індивідуальна стратегія медичного супроводу пацієнта [7,8]. Оцінка ризику для здоров'я, яка повинна проводитися для кожної особи, має реєструватися та оновлюватися в електронній картці пацієнта. Слід зазначити, що хоча багато дослідників використовують термін «персоналізована медицина» як синонім термінів «індивідуалізована» та «точна медицина», інші вважають, що між ними існують важливі, хоча й часто тонкі, відмінності.

Той факт, що насправді індивідуалізована медицина досі не була повною мірою впроваджена, не означає відсутності попиту на неї. Навпаки, інтерес до цього напряму залишається високим, а перспективи залучення інвестицій – значними. Зокрема, на ринку зростає попит на персональні переносні пристрої, здатні надавати інформацію про різні біологічні та медичні параметри. Їхня мета – відстежувати зміни біомаркерів, таких як частота серцевих скорочень, рівень глюкози або кисню в крові, споживання калорій, якість

повітря, режим сну, кількість та якість фізичних вправ тощо [9]. Такі пристрої викликають значний інтерес як у комерційних, так і в дослідницьких цілях. Щодо багатомільярдних комерційних перспектив, варто зазначити, що обсяг цього ринку у 2023 році оцінювався приблизно у 27,37 млрд доларів США і, за прогнозами, може зрости до 60,48 млрд доларів США до 2027 року [10]. В останньому випадку значна увага приділяється потенціалу, який пропонується в контексті раннього виявлення, діагностики та лікування захворювань. Їх технологія орієнтована на реалізацію чотирьох різних цілей, серед них: моніторинг, скринінг, виявлення і прогнозування. Моніторинг – це реалізація стратегії безперервного збору даних. Наявність невеликих і малопомітних пристроїв, які можна носити тривалий час без відчутного дискомфорту або інтегрувати в предмети повсякденного користування, зокрема розумні годинники, забезпечує безперервний потік даних, що значно підвищує їхню якість. Скринінг і виявлення є двома іншими функціями, які можуть виконувати персональні переносні пристрої. Вони дають змогу виявляти певні стани або відхилення від норми чи середніх показників, а також інформувати користувачів, осіб, які здійснюють догляд, і медичний персонал, що забезпечує можливість оперативного реагування. Що стосується функції прогнозування, то остання передбачає висвітлення майбутніх тенденцій з урахуванням зібраних біоданих. Серед усіх функцій вона є найменш реалізованою та найменш розробленою в доступних на сьогодні пристроях, а тому залишається найменш надійною. Іншою проблемою є отримання коректної інформації щодо конкретного пацієнта. Однією з ключових є проблема заповнення пропущених значень у наборах даних статистичними методами або за допомогою методів машинного навчання (так звана проблема імпутації). Її розв'язання є необхідним, оскільки моделі машинного навчання потребують повних даних, тоді як пропуски виникають унаслідок помилок реєстрації або втрати інформації.

У систематичних оглядах та метааналізах дослідники часто поєднують результати

вибіркового середнього та стандартного відхилення з набору аналогічних клінічних досліджень. Агрегування вимірювань у дискретні часові періоди може допомогти у вирішенні проблеми нерегулярних інтервалів, водночас може призвести до втрати деталізованої інформації. Крім того, при прогнозуванні часових рядів пропущені значення та їх закономірності часто корелюють з цільовими мітками, що називається інформативною відсутністю даних. Ці обмеження роблять недоцільним ігнорування, імпутацію або агрегування цих значень при обробці біомедичних часових рядів. Натомість слід використовувати модель, здатну обробляти розрідженість та нерегулярність клінічних часових рядів. Отже, для об'єднання результатів може знадобитися оцінка вибіркового середнього та стандартного відхилення для таких досліджень [11]. Найпоширенішими методами є заміна пропущених значень середнім або медіаною, використання алгоритмів k-найближчих сусідів, а також метод множинної імпутації за допомогою ланцюгових рівнянь.

На відміну від пропуску даних статистичні методи, такі як імпутація середнім або медіанним значенням, пропонують альтернативу, яка мінімізує вплив пропущених даних. Проблема пропусків даних нерозривно пов'язана з якістю результатів статистичного спостереження. Один із підходів до розв'язання цієї проблеми полягає у повному виключенні записів, що містять пропущені значення, однак це призводить до зменшення обсягу вибірки і, відповідно, може впливати на достовірність результатів. Водночас неправильна імпутація пропусків також може вплинути на довірчі інтервали [12]. Крім того, такий підхід не враховує часову інформацію і передбачає використання узагальнених статистичних методів імпутації, які часто не забезпечують точної заміни пропущених значень. Це може бути критично важливим у біомедичних застосуваннях з обмеженими наборами даних, де значення окремої точки даних може суттєво впливати на прогностичну здатність моделі. Використання методів імпутації на основі машинного навчання,

таких як метод максимальної правдоподібності з алгоритмом максимізації очікування, метод k-найближчих сусідів та матрична факторизація, може забезпечити більш точну імпутацію, що враховує специфіку окремих даних, на відміну від методів статистичної агрегації.

Однак вагома частка з них і досі не враховують часові зв'язки між спостереженнями та зазвичай є обчислювально витратними. Крім того, без урахування предметних знань такі підходи можуть спричиняти упередженість і призводити до хибних висновків. Як методи машинного навчання, так і статистичні методи можуть не враховувати розподіл даних або взаємозв'язки між змінними, а також не виявляти складні закономірності в багатовимірних часових рядах через ігнорування корельованих змінних, що потенційно може призводити до заниження або завищення значень [13]. Крім того, в системах підтримки ухвалення клінічних рішень у режимі реального часу своєчасні та точні дані мають вирішальне значення, оскільки затримки або помилки у введенні можуть призвести до неправильних рішень, які впливають на результати лікування пацієнтів. Ці системи потребують високошвидкісної обробки даних, тому алгоритми мають бути одночасно обчислювально ефективними та точними. До того ж, динамічний характер клінічного середовища, де стан пацієнтів швидко змінюється, вимагає методів застосування, які можуть швидко адаптуватися до змінних даних.

Як зазначалося вище, реактивна та проактивна стратегії організації медичної допомоги відрізняються за підходами до управління ризиками для здоров'я. Проактивна стратегія передбачає дії з урахуванням майбутніх потреб і реалізується до того, як ситуація переросте у проблему чи кризу. У медичній практиці це означає передбачення можливих негативних сценаріїв і застосування заходів для їх запобігання або мінімізації. Таким чином, проактивна медицина є підходом до охорони здоров'я, що зосереджується на профілактиці, ранньому виявленні захворювань та підвищенні обізнаності пацієнтів. Ця модель, яку часто розглядають як перспективний напрям розвитку системи охорони здоров'я, спрямована

на запобігання виникненню захворювань шляхом надання пацієнтам інформації про їхній спосіб життя та вплив факторів навколишнього середовища.

Поширеною є думка, що проактивна медицина обумовлює різке зниження витрат на охорону здоров'я та значне покращення здоров'я населення. Кінцевою метою проактивної медицини є зміцнення здоров'я та запобігання захворюванням. В організаційній психології термін проактивна поведінка стосується випереджувальних дій, ініційованих власними силами, які спрямовані на вплив на людей та/або їх оточення. Це протиставляється реактивному підходу, який передбачає реагування лише на вже наявні проблеми або зовнішні події. Проактивна охорона здоров'я – це використання методів прогнозування стану пацієнта та забезпечення персоналізованої охорони здоров'я. Основою проактивної охорони здоров'я є покращений збір даних, використання інструментів прогнозування, агрегація даних для прискореного ухвалення рішень та генетичне тестування.

У свою чергу, реактивна медицина – це тип моделі, який широко використовується й сьогодні. Її основу складають проблеми лікування захворювань та патологічних станів. На відміну від проактивної медичної допомоги, такий підхід не передбачає підготовки до можливих захворювань. Реактивна модель охорони здоров'я має низку традиційних проблем, що впливають на пацієнтів, клініцистів і систему охорони здоров'я загалом. Одним із важливих чинників зміни цієї парадигми стало здешевлення секвенування повного геному людини. Секвенування геному передбачає визначення послідовності пар основ, що складають ДНК. У результаті формується масив даних, який містить мільярди нуклеотидних комбінацій. Доступність недорогого секвенування повного геному має значний потенціал для розвитку як практичної медицини, так і наукових досліджень.

Порівняння індивідуальних повних геномів сприяє кращому розумінню внеску генетичних варіацій у формування здоров'я та розвиток захворювань.

Із зниженням вартості геномного аналізу та накопиченням наукових знань ці дані набуватимуть дедалі більшого значення для системи охорони здоров'я. Епігенетичні маркери потенційно можуть використовуватися для оцінки ризику в популяційних програмах скринінгу раку, стратифікованих за рівнем ризику. Тоді як чинні програми скринінгу зазвичай спрямовані на виявлення вже наявного раку, епігенетичні маркери можуть застосовуватися для оцінки ризику розвитку раку ще до появи такого захворювання.

Таким чином, епігенетичні тести для прогнозування ризику можуть сформулювати можливість для оцінки ризику розвитку раку в майбутньому. Враховуючи, що епігенетичні зміни можна модифікувати, то профілактичні заходи, такі як зміна способу життя, можуть бути використані для мінімізації ризику раку. Крім того, епігенетичні маркери можуть застосовуватися для моніторингу відповіді на профілактичні втручання, спрямовані на зниження ризику. В такому разі, виникають нові етичні проблеми, пов'язані з особистою відповідальністю, яку викликають епігенетичні тести прогнозування під час скринінгу онкологічної популяції. Ці проблеми пов'язані з виникненням низки нових етичних питань, зокрема: «Чи повинні люди нести відповідальність за власне здоров'я з огляду на соціальні витрати на лікування?»; «Чи зростатиме відповідальність людей за власне здоров'я і, відповідно, за негативні наслідки для нього?»; «Чи можуть вони бути піддані осуду або моральним санкціям у разі нехтування турботою про власне здоров'я?».

Гнучкі мініатюрні датчики для фізіологічного моніторингу отримали значну увагу через їх широке застосування для збору інформації, пов'язаної зі станом здоров'я, людини в довгостроковій перспективі [14,15]. Фізіологічний моніторинг може надати детальну інформацію про стан здоров'я, а тому має великий потенціал для персоналізованого медичного обслуговування [16]. Ідеальні датчики для фізіологічного моніторингу мають бути зручними у використанні, мініатюрними, біосумісними, надійними та швидкодіючими; вони не повинні потребувати додаткового обладнання,

мають бути довговічними, недорогими та сумісними з навколишнім середовищем. Персональні переносні пристрої стають перспективними платформами для безперервного моніторингу стану здоров'я завдяки простоті використання, багатофункціональності та високому рівню інтеграції. Такі пристрої можуть прикріплюватися до поверхні шкіри для здійснення фізіологічного моніторингу і класифікуються як переносні аксесуари (зокрема розумні пристрої), гнучкі електронні системи, епідермальні електронні датчики та пластирі з мікроголками.

Інтелектуальні пристрої у вигляді аксесуарів передбачають інтеграцію передових датчиків у такі предмети, як годинники, окуляри, браслети тощо. Гнучкі пристрої є однією з провідних технологій носимої електроніки, у якій жорсткі електронні компоненти та чутливі елементи вбудовуються у гнучку підкладку, що дає змогу адаптуватися до деформацій шкіри людини під час фізичної активності та рухів. Інтернет речей (далі – IoT) – це одна з найактуальніших наукових ідей сучасної інформатики, яка наразі активно втілюється у реальність. IoT здатний вагомо вплинути на розвиток сучасного суспільства, оскільки надає змогу багатьом процесам відбуватися без участі людини. Варто зауважити, що IoT – це глобальна мережа підключених до такої мережі пристроїв, з вбудованими сенсорами, датчиками, засобами передавання сигналів. Таким чином, розподілена робототехніка поступово стає реальністю, відкриваючи можливості для переходу до нового етапу розвитку медицини. Нова парадигма полягає у здійсненні глобального переходу від використання технологій мереж датчиків до мереж виконавчих пристроїв. Ця парадигма знаменує принципово новий підхід, оскільки формується повсюдний, інтелектуальний, «живий» Інтернет.

Крім того, стає можливим наділяти «звичайні» пристрої функціями обробки та узагальнення даних, виявлення трендів і оцінки реальних ризиків розвитку патологій, а в найближчому майбутньому — прийняття рішень без участі людини, особливо у критичних ситуаціях. Таким чином, IoT стає наступним етапом щодо

формування глобальної мережевої інфраструктури з потенційно трансформаційними перевагами для цілого каталогу додатків та послуг, передусім, для охорони здоров'я. В такому випадку, сенсорні мережі стають справжніми помічниками лікарів щодо дистанційного контролю стану пацієнтів. В останні ж роки, стрімкого розвитку набуває технологія IoT, пов'язаного з використанням ШІ в комунікаційних мережах. Зауважимо, що розумні датчики та пристрої також інтегруються в електронну побутову техніку, гаджети, мобільні телефони та планшети.

Усе це забезпечує можливість зазначеним пристроям функціонувати автономно. Подальший розвиток цієї парадигми пов'язаний із реалізацією наступного глобального переходу – від використання технологій мереж датчиків до мереж виконавчих пристроїв. У таких умовах стає можливим не лише оброблення й узагальнення даних, а й виявлення трендів в умовах невизначеності. Крім того, відкриваються можливості для оцінки ризиків розвитку патології та прогнозування можливих ускладнень патологічного процесу, а в найближчому майбутньому – для прийняття рішень без участі людини, особливо у критичних ситуаціях.

Перевагами IoT слід вважати можливість доступу до інформації з будь-якої точки світу, в будь-який час та на будь-якому пристрої; покращений зв'язок між підключеними електронними пристроями; передача пакетів даних підключеною мережею, що дає змогу заощаджувати час і витрати ресурсів; автоматизація діагностичних завдань, що сприяє підвищенню якості надання медичної допомоги та зниженню потреби в безперервному лікарському контролі.

Водночас, IoT має свої недоліки. Найбільш суттєві з них пов'язані з тим, що зі збільшенням кількості підключених пристроїв та обсягу інформації, якою вони обмінюються, зростає ймовірність витоку персональних даних (конфіденційної інформації). Крім того, лікувальні заклади можуть у підсумку мати справу з величезною кількістю (мільйонами і більше) пристроїв IoT. Збір і управління даними з усіх цих пристроїв можуть стати складним

завданням. У разі виникнення помилки в системі існує ризик порушення роботи всіх підключених пристроїв. Нарешті, через відсутність єдиного міжнародного стандарту сумісності для IoT досить складно забезпечити взаємодію пристроїв різних виробників. Докорінні зміни у технологіях збору медичної інформації призвели до радикальної трансформації технічної та технологічної складової обстеження пацієнтів. Зупинимося на деяких із них.

Щоб зменшити навантаження на контакт і покращити кріплення датчиків на поверхні шкіри, запропоновані тонкі, м'які та дихаючі епідермальні електронні датчики. Балістокардіограма є перспективним неінвазивним методом реєстрації серцевих коливань, що дає змогу зменшити дискомфорт і обмеження рухової активності, які часто супроводжують традиційне тривале медичне спостереження [17].

В останні роки було запропоновано інтелектуальну бездротову гнучку сенсорну систему, призначену для неінвазивного моніторингу балістокардіограми та дихання. Основним компонентом системи є гнучкий датчик тиску з градієнтною сферичною мікроструктурою корони, яка забезпечує високу чутливість до слабких сигналів динамічного тиску навіть за високого статичного тиску. Ця чутливість дає змогу датчику, прикріпленому до сидіння, точно реєструвати тонкі фізіологічні сигнали людини, що перебуває в сидячому положенні. Крім того, система має потенціал для використання в оцінці варіабельності серцевого ритму, відкриваючи нові можливості застосування гнучких датчиків у сфері безперервного моніторингу стану здоров'я людини.

Прогрес у розвитку трибоелектричних наногенераторів як нової енергетичної технології відкриває можливості для створення сенсорів з автономним живленням [18]. Трибоелектричний ефект – це явище електризації тіл під час тертя. Він зумовлений встановленням і розривом контакту між поверхнями тіл. Під час контакту, принаймні на окремих ділянках поверхонь, відбувається адгезія – злипання поверхонь тіл. Унаслідок цього носії заряду з одного матеріалу частково переходять до іншого, прагнучи

вирівняти електрохімічні потенціали. Після швидкого розриву контакту частина носіїв заряду залишається в іншому матеріалі, утворюючи надлишковий електричний заряд. Цей механізм може посилюватися п'єзоелектричним ефектом, оскільки під час тертя виникають механічні напруження, а також піроелектричним ефектом, адже тертя супроводжується нагріванням тіл.

Починаючи з першого звіту в січні 2012 року, його щільність вихідної площі досягла 500 Втм<sup>-2</sup>, а миттєва ефективність перетворення становить ~70%, а загальна ефективність перетворення енергії до 85%. Трибоелектричний наногенератор може використовуватися для збору енергії з різних джерел механічного руху – зокрема під час руху людини, ходьби, вібрацій, обертання коліс, дії вітру або течії води. Отримана енергія може застосовуватися для живлення сенсорів з автономним енергозабезпеченням.

За останні роки, були запропоновані портативні датчики для телемедицини на основі нових матеріалів і наноархітектоніки. портативні датчики досягли значного прогресу у визначенні фізіологічних і біохімічних маркерів для телемедицини [19,20]. Відстежуючи такі життєві важливі показники, як температура тіла, насичення артеріальної крові киснем і частота дихання, портативні датчики забезпечують величезний потенціал для раннього виявлення захворювань. Досягнуто значних успіхів у розробці портативних датчиків на основі двовимірних матеріалів із гнучкістю, чудовою механічною стабільністю, високою чутливістю та точністю, що запроваджує новий підхід до дистанційного моніторингу стану здоров'я в реальному часі. Описано основні типи портативних датчиків, які були класифіковані відповідно до їхнього механізму сприйняття, наприклад датчики тиску, деформації, електрохімічні, оптоелектронні та температурні [19].

Розроблені портативні тензодатчики для виявлення руху людини та моніторингу здоров'я на основі гібридних графітно-текстильних гнучких електродів [21]. Високу ефективність демонструє нанесення графітових покриттів на гнучкі

та розтяжні текстильні матеріали для виготовлення електронних пристроїв. У свою чергу, графітні олівці використовуються для безпосереднього нанесення графіту на комерційний текстиль методом малювання. Текстиль із графітовим покриттям використовується як електродний матеріал для виготовлення багатофункціональних розтяжних датчиків. Для формування графітових покриттів застосовується стратегія попередньої деформації, яка дає змогу не лише регулювати чутливість датчиків, а й підвищувати стабільність електричного опору пристроїв. В подальшому, виготовлений датчик використовується для виявлення руху людини та моніторингу здоров'я; він ефективно реєструє навантаження, що виникають під час руху органів людини, а також, завдяки своїй багатофункціональності, здатний фіксувати зміни вологості та потовиділення, температури й інтенсивності освітлення.

Одним із перспективних напрямів розвитку портативних медичних пристроїв є використання кардіологічних патчів для тривалого моніторингу електрокардіограми. На відміну від традиційного холтерівського моніторингу, яке зазвичай обмежується приблизно 24 годинами спостереження, такі системи дають змогу здійснювати безперервний запис серцевого ритму протягом значно довшого періоду. Це має важливе значення, оскільки епізоди аритмії можуть виникати нерегулярно і не завжди фіксуються під час короткотривалого обстеження. Тривалий моніторинг за допомогою компактних переносних пристроїв підвищує ймовірність виявлення прихованих порушень серцевого ритму. Сучасні кардіологічні патчі являють собою невеликі водостійкі сенсорні пристрої, що фіксуються на шкірі грудної клітки та забезпечують безперервний запис електрокардіограми протягом кількох днів або навіть тижнів. Завдяки компактним розмірам і простоті використання пацієнт може вести звичайний спосіб життя під час моніторингу. Після завершення періоду спостереження накопичені дані аналізуються за допомогою спеціалізованих алгоритмів, зокрема методів машинного навчання, які допомагають

виявляти потенційні аритмії та інші відхилення.

Остаточна інтерпретація результатів здійснюється лікарем-кардіологом. Застосування таких технологій особливо перспективне для скринінгу порушень серцевого ритму у пацієнтів груп ризику, зокрема осіб похилого віку або хворих на артеріальну гіпертензію. Тривалий амбулаторний моніторинг дозволяє частіше виявляти безсимптомні форми аритмії, що сприяє своєчасному призначенню профілактичного лікування та зниженню ризику ускладнень.

Надалі слід звернути увагу на портативні магнітно-резонансні томографи. Одним із прикладів є система Swoor компанії Hyperfine – переносний томограф, який можна розмістити безпосередньо біля ліжка пацієнта та підключити до стандартної електромережі. Хоча напруженість магнітного поля такого пристрою значно нижча, ніж у стаціонарних томографів (близько 0,064 Тл), використання сучасних алгоритмів обробки зображень на основі штучного інтелекту дає змогу зменшувати рівень шуму та покращувати якість отриманих зображень до рівня, придатного для діагностики. Це дозволяє лікарям у реанімаціях та відділеннях невідкладної медичної допомоги швидко діагностувати інсульти, внутрішньочерепні крововиливи або пухлини головного мозку без необхідності транспортування критично хворого пацієнта лікарем.

А от систему LumineticsCore від Digital Diagnostics позиціонують як революцію у діагностиці діабетичної ретинопатії. Вона поєднує спеціальну камеру для фотографування очного дна та алгоритми глибокого навчання, які автоматично аналізують отримані зображення і формують висновок щодо наявності або відсутності патології. У 2018 році ця технологія стала першою автономною ШІ-системою, яка отримала дозвіл Управління з контролю за продуктами і ліками США на постановку клінічного діагнозу. Після ключового випробування в медичних установах США ця технологія швидко набула поширення по всьому світу. Медичні фахівці також відзначають, що система здатна виявляти ранні патологічні зміни сітківки, які можуть залишатися непоміченими під

час стандартного офтальмологічного огляду.

Доступ до технологій точної або персоналізованої медицини, таких як геномне секвенування та тестування біомаркерів, часто потребує значних фінансових ресурсів і спеціалізованої інфраструктури охорони здоров'я, які переважно зосереджені в економічно розвинених і міських регіонах. Унаслідок цього маргіналізовані та недостатньо забезпечені медичними послугами групи населення можуть стикатися з додатковими перешкодами у доступі до таких медичних послуг. На жаль, персоналізована медицина пов'язана зі значними ризиками, включаючи порушення конфіденційності даних, високі витрати, що посилюють нерівність в системі охорони здоров'я та інші етичні проблеми, пов'язані з генетичною дискримінацією. Основні проблеми включають відсутність стандартизованої доказової бази, потенційне неправомірне використання конфіденційних геномних даних страховими компаніями чи роботодавцями, а також психологічний вплив несподіваних випадкових результатів, що можуть потребувати подальших медичних втручань.

Впровадження прецизійної, персоналізованої медицини та інших нових стратегій без продуманого підходу й коректного застосування математичних методів може посилити існуючі відмінності та призвести до зростання нерівності у сфері охорони здоров'я [22,23]. Математичне моделювання стало важливим дослідницьким інструментом для вивчення складних систем, а останнім часом – також для аналізу функціонування та оптимізації систем охорони здоров'я. Моделі системної динаміки та агентні моделі є двома популярними взаємопов'язаними методами, що використовуються для моделювання поведінки систем охорони здоров'я на макро- та мікрорівнях.

На відміну від моделей системної динаміки, агентно-орієнтовані моделі розглядають систему «знизу вгору», імітуючи зміни стану окремих агентів у системі, а не узагальнених сутностей або сукупної поведінки, що характерно для моделей системної динаміки. Водночас сукупна поведінка системи може бути отримана на

основі взаємодії окремих агентів. Використання агентно-орієнтованого моделювання для аналізу поведінки систем має міждисциплінарний характер і застосовується в економіці, екології, соціальних науках та інженерії [24]. Моделюється кілька типів агентів, кожному з яких присвоюються свої характеристики та модель поведінки [25]. Агенти можуть навчатися на власному досвіді, приймати рішення і виконувати дії на основі заданих правил (наприклад, евристик), які визначаються їх взаємодією з іншими агентами, їх власними присвоєними атрибутами або на основі їх взаємодії з середовищем, що моделюється [26].

В останні роки поширюються дослідження з гібридного моделювання, у яких використовуються моделі, здатні поєднувати агентно-орієнтоване моделювання та моделювання системної динаміки [27]. Ключові дії на макро- та мікрорівнях, відображені в таких моделях, формують зворотні зв'язки в ширшій складній системі, зберігаючи водночас змінну поведінку тих, хто отримує або надає медичну допомогу. Із розвитком програмного забезпечення та зростанням попиту на мультиметодне моделювання такі підходи дедалі ширше застосовуватимуться під час моделювання систем охорони здоров'я.

**Висновки.** 1. Новітні стратегії надання медичної допомоги, що ґрунтуються на характеристиках окремого пацієнта на різних рівнях (геномному,

біохімічному, поведінковому тощо), набувають особливої актуальності у зв'язку з доступністю клінічно значущих показників індивідуальних відмінностей. Сучасні біомедичні технології, зокрема секвенування ДНК, протеоміка, а також нові технічні можливості – бездротові пристрої моніторингу, портативні датчики тощо – дали змогу виявляти ці відмінності та, фактично, обґрунтували необхідність упровадження нових стратегій у сфері охорони здоров'я.

2. Подальші завдання, пов'язані з розвитком цих підходів, полягатимуть не лише у підвищенні ефективності методів характеристики індивідуальних особливостей пацієнтів, але й у розробленні та перевірці персоналізованих методів лікування з метою підтвердження їхньої клінічної ефективності.

3. Існує також низка інших проблем, пов'язаних із впровадженням нових стратегій у сфері охорони здоров'я, які потребують подальшого дослідження. Серед них – формування відкритих систем охорони здоров'я, обробка великих масивів медичних даних, а також особливості використання ШІ, що викликає занепокоєння щодо конфіденційності та можливого неправомірного використання персональних даних. Крім того, для широкого впровадження персоналізованої медицини необхідно розробити та запровадити ефективніші програми навчання і підготовки медичних працівників.

### Література.

1. Informative missingness: what can we learn from patterns in missing laboratory data in the electronic health record? / Tan A. L. M., Getzen E. J., Hutch M. R., Ey Z. H. et al. // *J. Biomed. Inform.* – 2023. – Vol. 139. – 104306. – DOI: 10.1016/j.jbi.2023.104306.
2. The danger of precision medicine hesitancy / Demichelis A. // *Glob. Philosophy.* – 2025. – Vol. 35. – 13. – DOI: 10.1007/s10516-025-09747-4.
3. Personalised medicine – implementation to the healthcare system in Europe (focus group discussions) / Stefanicka-Wojtas D., Kurpas D. // *J. Pers. Med.* – 2023. – Vol. 13, № 3. – 380. – DOI: 10.3390/jpm13030380.
4. What is preventive medicine? / Clarke E. A. // *Can. Fam. Physician.* – 1974. – Vol. 20, № 11. – P. 65–68.
5. Профілактична медицина як важлива складова громадського здоров'я / Лотоцька В. А., Кондратюк О. М., Сопель Г. А., Крицька К. О., Пашко О. Є., Федорів О. Є. // *Вісн. соц. гігієни та організації охорони здоров'я України.* – 2019. – № 2 (80). – С. 40–43.
6. Preventive and curative medical interventions / Fuller J. // *Synthese.* – 2022. – Vol. 200, № 2. – 61. – DOI: 10.1007/s11229-022-03579-0.
7. Clinical trials for predictive medicine: new challenges and paradigms / Simon R. // *Clin.*

- Trials. – 2010. – Vol. 7, № 5. – P. 516–524. – DOI: 10.1177/1740774510366454.
8. Predictive medicine / Jen M. Y., Shahrokhi M., Varacallo M. // StatPearls. – Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2025. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK441941>.
9. Biosensors applications in medical field: a brief review / Haleem A., Javaid M., Singh R. P., Suman R., Rab S. // Sensors International. – 2021. – Vol. 2. – 100100. – DOI: 10.1016/j.sintl.2021.100100.
10. Wearable Medical Devices Global Market Report 2023. – ReportLinker. – URL: <https://finance.yahoo.com/news/wearable-medical-devices-global-market-145100386.html>.
11. Estimating the sample mean and standard deviation from the sample size, median, range and/or interquartile range / Wan X., Wang W., Liu J., Tong T. // BMC Med. Res. Methodol. – 2014. – Vol. 14. – 135. – DOI: 10.1186/1471-2288-14-135.
12. Нові тенденції у доказовій статистиці: проблеми імпутації даних / Ковтун Н. В., Фаталієва А.-Н. Я. // Статистика України. – 2019. – № 4 (87). – DOI: 10.31767/su.4(87)2019.04.01.
13. Dealing with missing standard deviation and mean values in meta-analysis of continuous outcomes: a systematic review / Weir C. J., Butcher I., Assi V., Lewis S. C., Murray G. D., Langhorne P., Brady M. C. // BMC Med. Res. Methodol. – 2018. – Vol. 18, № 1. – 25. – DOI: 10.1186/s12874-018-0483-0.
14. Wearable devices: implications for precision medicine and the future of health care / Babu M., Lautman Z., Lin X., Sobota M. H., Snyder M. P. // Annu. Rev. Med. – 2024. – Vol. 75, № 1. – P. 401–415.
15. Challenges and recommendations for wearable devices in digital health: data quality, interoperability, health equity, fairness / Canali S., Schiaffonati V., Aliverti A. // PLOS Digit. Health. – 2022. – Vol. 1, № 10. – e0000104.
16. Wearable devices for precision medicine and health state monitoring / Jeong I. C., Bychkov D., Searson P. C. // IEEE Trans. Biomed. Eng. – 2019. – Vol. 66, № 5. – P. 1242–1258.
17. Ballistocardiography – a method worth revisiting / Giovangrandi L., Inan O. T., Wiard R. M., Etemadi M., Kovacs G. T. // Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. – 2011. – P. 4279–4282. – DOI: 10.1109/IEMBS.2011.6091062.
18. Triboelectric nanogenerators / Cheng T., Shao J., Wang Z. L. // Nat. Rev. Methods Primers. – 2023. – Vol. 3. – 39. – DOI: 10.1038/s43586-023-00220-3.
19. Wearable sensors for telehealth based on emerging materials and nanoarchitectonics / Vaghasiya J. V., Mayorga-Martinez C. C., Pumera M. // npj Flex. Electron. – 2023. – Vol. 7. – 26. – DOI: 10.1038/s41528-023-00261-4.
20. Wearable strain sensors for human motion detection and health monitoring based on hybrid graphite-textile flexible electrodes / Sonil N. I., Ullah Z., Chen J., Wang G. P. // J. Mater. Res. Technol. – 2023. – Vol. 26. – P. 764–774. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.07.185.
21. A high-performance wearable strain sensor with advanced thermal management for motion monitoring / Tan C., Dong Z., Li Y. et al. // Nat. Commun. – 2020. – Vol. 11. – 3530. – DOI: 10.1038/s41467-020-17301-6.
22. Introduction to precision medicine / Lip S., Padmanabhan S. // Medicine. – 2025. – Vol. 53, № 7. – P. 476–482. – DOI: 10.1016/j.mpmed.2025.04.018.
23. Review of precision cancer medicine: evolution of the treatment paradigm / Tsimberidou A. M. et al. // Cancer Treat. Rev. – 2020. – Vol. 86. – 102019. – DOI: 10.1016/j.ctrv.2020.102019.
24. An introduction to agent-based modeling / Wilensky U., Rand W. – Cambridge: MIT Press, 2015.
25. A generalized agent-based model to simulate emergency departments / Liu Z., Cabrera E., Rexachs D., Luque E. // Proc. Sixth Int. Conf. Adv. Syst. Simul. – 2014. – P. 65–70.
26. Simulating the behavior of patients who leave a public hospital emergency department without being seen by a physician: a cellular automaton and agent-based framework / Yousefi M., Yousefi M., Fogliatto F. S., Ferreira R. P. M., Kim J. H. // Braz. J. Med. Biol. Res. – 2018. – Vol. 51. – e6961. – DOI: 10.1590/1414-431x20176961.
27. Hybrid simulation with loosely coupled system dynamics and agent-based models for prospective health technology assessments / Djanatliev A., German R., Kolominsky-Rabas P., Hofmann B. M. // Proc. Winter Simul. Conf. – 2012. – P. 69:1–69:12.

## References.

1. Tan, A. L. M., Getzen, E. J., Hutch, M. R., & Ey, Z. H. (2023). Informative missingness: What can we learn from patterns in missing laboratory data in the electronic health record? *Journal of Biomedical Informatics*, 139, 104306. doi: 10.1016/j.jbi.2023.104306.
2. Demichelis, A. (2025). The danger of precision medicine hesitancy. *Global Philosophy*, 35, 13. doi: 10.1007/s10516-025-09747-4.
3. Stefanicka-Wojtas, D., & Kurpas, D. (2023). Personalised medicine – implementation to the healthcare system in Europe (focus group discussions). *Journal of Personalized Medicine*, 13(3), 380. doi: 10.3390/jpm13030380.
4. Clarke, E. A. (1974). What is preventive medicine? *Canadian Family Physician*, 20(11), 65–68.
5. Lototska, V. A., Kondratiuk, O. M., Sopol, H. A., Krytska, K. O., Pashko, O. Ye., & Fedoriv, O. Ye. (2019). Profilaktychna medytsyna yak vazhlyva skladova hromadskoho zdorovia [Preventive medicine as an important component of public health]. *Visnyk sotsialnoi hihiieny ta orhanizatsii okhorony zdorovia Ukrainy*, 2(80), 40–43. DOI: 10.11603/1681-2786.2019.2.10478 [In Ukrainian].
6. Fuller, J. (2022). Preventive and curative medical interventions. *Synthese*, 200(2), 61. doi: 10.1007/s11229-022-03579-0.
7. Simon, R. (2010). Clinical trials for predictive medicine: New challenges and paradigms. *Clinical Trials*, 7(5), 516–524. doi: 10.1177/1740774510366454
8. Jen, M. Y., Shahrokhi, M., & Varacallo, M. (2025). Predictive medicine. In *StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing. Retrieved from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK441941>.
9. Haleem, A., Javaid, M., Singh, R. P., Suman, R., & Rab, S. (2021). Biosensors applications in medical field: A brief review. *Sensors International*, 2, 100100. doi: 10.1016/j.sintl.2021.100100.
10. ReportLinker. (2023). Wearable medical devices global market report 2023. Retrieved from: <https://finance.yahoo.com/news/wearable-medical-devices-global-market-145100386.html>.
11. Wan, X., Wang, W., Liu, J., & Tong, T. (2014). Estimating the sample mean and standard deviation from the sample size, median, range and/or interquartile range. *BMC Medical Research Methodology*, 14, 135. doi: 10.1186/1471-2288-14-135
12. Kovtun, N. V., & Fataliieva, A.-N. Ya. (2019). Novi tendentsii u dokazovii statystytsi: problemy imputatsii danykh [New trends in evidence-based statistics: Problems of data imputation]. *Statystyka Ukrainy*, 4(87). DOI: 10.31767/su.4(87)2019.04.01 [In Ukrainian].
13. Weir, C. J., Butcher, I., Assi, V., Lewis, S. C., Murray, G. D., Langhorne, P., & Brady, M. C. (2018). Dealing with missing standard deviation and mean values in meta-analysis of continuous outcomes: A systematic review. *BMC Medical Research Methodology*, 18(1), 25. doi: 10.1186/s12874-018-0483-0.
14. Babu, M., Lautman, Z., Lin, X., Sobota, M. H., & Snyder, M. P. (2024). Wearable devices: Implications for precision medicine and the future of health care. *Annual Review of Medicine*, 75(1), 401–415.
15. Canali, S., Schiaffonati, V., & Aliverti, A. (2022). Challenges and recommendations for wearable devices in digital health: Data quality, interoperability, health equity, fairness. *PLOS Digital Health*, 1(10), e0000104.
16. Jeong, I. C., Bychkov, D., & Searson, P. C. (2019). Wearable devices for precision medicine and health state monitoring. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 66(5), 1242–1258.
17. Giovangrandi, L., Inan, O. T., Wiard, R. M., Etemadi, M., & Kovacs, G. T. (2011). Ballistocardiography – a method worth revisiting. In *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 4279–4282. doi: 10.1109/IEMBS.2011.6091062.
18. Cheng, T., Shao, J., & Wang, Z. L. (2023). Triboelectric nanogenerators. *Nature Reviews Methods Primers*, 3, 39. doi: 10.1038/s43586-023-00220-3.
19. Vaghasiya, J. V., Mayorga-Martinez, C. C., & Pumera, M. (2023). Wearable sensors for telehealth based on emerging materials and nanoarchitectonics. *npj Flexible Electronics*, 7, 26. doi: 10.1038/s41528-023-00261-4.

20. Sonil, N. I., Ullah, Z., Chen, J., & Wang, G. P. (2023). Wearable strain sensors for human motion detection and health monitoring based on hybrid graphite-textile flexible electrodes. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 764–774. doi: 10.1016/j.jmrt.2023.07.185.
21. Tan, C., Dong, Z., Li, Y., et al. (2020). A high-performance wearable strain sensor with advanced thermal management for motion monitoring. *Nature Communications*, 11, 3530. doi: 10.1038/s41467-020-17301-6.
22. Lip, S., & Padmanabhan, S. (2025). Introduction to precision medicine. *Medicine*, 53(7), 476–482. doi: 10.1016/j.mpmed.2025.04.018.
23. Tsimberidou, A. M., et al. (2020). Review of precision cancer medicine: Evolution of the treatment paradigm. *Cancer Treatment Reviews*, 86, 102019. doi: 10.1016/j.ctrv.2020.102019.
24. Wilensky, U., & Rand, W. (2015). *An introduction to agent-based modeling*. Cambridge: MIT Press.
25. Liu, Z., Cabrera, E., Rexachs, D., & Luque, E. (2014). A generalized agent-based model to simulate emergency departments. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Advanced System Simulation*, 65–70.
26. Yousefi, M., Yousefi, M., Fogliatto, F. S., Ferreira, R. P. M., & Kim, J. H. (2018). Simulating the behavior of patients who leave a public hospital emergency department without being seen by a physician: A cellular automaton and agent-based framework. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 51, e6961. doi: 10.1590/1414-431x20176961.
27. Djanatliev, A., German, R., Kolominsky-Rabas, P., & Hofmann, B. M. (2012). Hybrid simulation with loosely coupled system dynamics and agent-based models for prospective health technology assessments. In *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 69:1–69:12.

**ORCID:**

O. P. Mintser: 0000-0002-7224-4886

Yu. V. Voronenko: 0000-0003-4945-1817