

---

## ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В СУЧАСНІЙ ТРАВМАТОЛОГІЇ: СТАН, ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

---

Чорний В. М.

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-593-8-23>

### ВСТУП

У сучасному світі травматологія стикається з численними викликами, пов'язаними з високою частотою травм, складністю діагностики та необхідністю швидкого прийняття клінічних рішень. Зростаюча кількість дорожньо-транспортних пригод, виробничих травм та наслідків військових конфліктів, зокрема в Україні, підкреслює потребу в ефективних та інноваційних підходах до надання медичної допомоги постраждалим. У цьому контексті штучний інтелект (ШІ) виступає як потужний інструмент, здатний трансформувати традиційні методи діагностики, лікування та реабілітації в травматології<sup>1</sup>.

ШІ охоплює широкий спектр технологій, включаючи машинне навчання, глибоке навчання, обробку природної мови та комп'ютерний зір, які знаходять застосування в різних аспектах медичної практики. У травматології ці технології використовуються для автоматичного аналізу медичних зображень, прогнозування ускладнень, оптимізації хірургічних втручань та персоналізації реабілітаційних програм. Наприклад, системи на основі глибокого навчання демонструють високу точність у виявленні переломів на рентгенівських знімках, що дозволяє зменшити навантаження на лікарів та підвищити якість діагностики.

Крім того, ШІ сприяє вдосконаленню хірургічних процедур шляхом впровадження роботизованих систем, які забезпечують більшу точність та мінімальну інвазивність операцій. У післяопераційному періоді алгоритми машинного навчання використовуються для моніторингу стану пацієнтів та раннього виявлення можливих ускладнень, що сприяє своєчасному втручанню та покращенню результатів лікування.

Проте впровадження ШІ в травматологію супроводжується низкою викликів. Серед них – необхідність забезпечення високої якості та

---

<sup>1</sup> Hassan Tanveer. Transforming trauma care through artificial intelligence integration. – February 2025 International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation 06(01):869-879. DOI: 10.54660/IJMRGE.2025.6.1.869-879

достовірності медичних даних, етичні та правові аспекти використання автоматизованих систем, а також потреба в підготовці медичних працівників до роботи з новими технологіями. Особливо актуальним є питання інтеграції ШІ в існуючі клінічні протоколи та забезпечення інтероперабельності з наявними інформаційними системами охорони здоров'я<sup>2</sup>.

Незважаючи на ці труднощі, перспективи розвитку ШІ в травматології залишаються обнадійливими. Очікується, що подальші дослідження та інновації сприятимуть створенню більш ефективних, безпечних та персоналізованих методів лікування травм. Зокрема, розвиток предиктивної аналітики дозволить прогнозувати ризики ускладнень, а інтеграція ШІ з електронними медичними записами – забезпечити безперервний моніторинг стану пацієнтів.

Метою даної статті є аналіз сучасного стану використання ШІ в травматології, виявлення основних викликів та обговорення перспектив подальшого розвитку цієї галузі. Особлива увага приділяється практичним аспектам впровадження ШІ в клінічну практику, а також необхідності міждисциплінарної співпраці для досягнення максимального ефекту від використання новітніх технологій у лікуванні травм.

## 1. Сучасний стан використання штучного інтелекту в травматології

Штучний інтелект (ШІ) стрімко інтегрується в сучасну медицину, зокрема в травматологію, відкриваючи нові можливості для діагностики, прогнозування, планування хірургічних втручань і реабілітації. Цей розділ присвячено аналізу ключових напрямів застосування ШІ в травматології, прикладам успішного впровадження технологій у клінічну практику, а також огляду доступних інструментів і платформ, що використовуються в цій галузі.

Одним із найпоширеніших застосувань ШІ в травматології є автоматизована діагностика травм за допомогою аналізу медичних зображень, таких як рентгенівські знімки, комп'ютерна томографія (КТ) і магнітно-резонансна томографія (МРТ). Алгоритми комп'ютерного зору, зокрема згорткові нейронні мережі (Convolutional Neural Networks, CNN), демонструють високу точність у виявленні переломів, вивихів, тріщин кісток та інших патологій<sup>3</sup>. Наприклад, алгоритми ШІ здатні ідентифікувати переломи проксимального відділу стегнової кістки на рентгенівських знімках із точністю, що перевищує 95%, що порівнянно з результатами досвідчених радіологів.

---

<sup>2</sup> Junaid Bajwa. Artificial intelligence in healthcare: transforming the practice of medicine. – Future Healthc J. 2021 Jul;8(2):e188–e <https://doi.org/10.7861/fhj.2021-0095>

<sup>3</sup> Lata Chawhan. Bone Fracture Detection and Classification using Machine Learning. – Conference: 2024 Second International Conference on Networks, Multimedia and Information Technology (NMITCON) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2514664524005277?via%3Dihub>

ІІІ також використовується для сегментації зображень, що дозволяє точно визначати межі уражених тканин, наприклад, при складних переломах або пошкодженнях м'яких тканин. Системи на основі ІІІ, такі як Zebra Medical Vision і Aidoc, автоматично аналізують зображення, виявляючи аномалії та надаючи лікарям попередні висновки, що значно скорочує час діагностики. Крім того, ІІІ здатний виявляти субклінічні ознаки, які можуть бути непомітними для людського ока, наприклад, мікротріщини або ранні ознаки остеопорузу.

Іншим важливим аспектом є можливість ІІІ обробляти великі обсяги даних у реальному часі. Наприклад, у відділеннях невідкладної допомоги, де швидкість діагностики є критичною, системи ІІІ можуть обробляти КТ-зображення для виявлення внутрішніх кровотеч або травм суглобів за лічені хвилини, що сприяє швидкому прийняттю клінічних рішень<sup>4</sup>.

ІІІ відіграє важливу роль у прогнозуванні ускладнень і оцінці ризиків у травматології. Алгоритми машинного навчання (ML) аналізують великі масиви даних, включаючи клінічні записи, лабораторні результати, історію хвороби та генетичні дані, для передбачення ймовірності таких ускладнень, як інфекції, тромбози або затримка зрощення кісток. Наприклад, моделі прогнозування на основі ІІІ можуть оцінити ризик післяопераційних інфекцій у пацієнтів із відкритими переломами, використовуючи дані про вік, супутні захворювання та тип травми.

Крім того, ІІІ застосовується для оцінки ризику повторних травм або хронічного болю. Наприклад, алгоритми аналізують біомеханічні дані, отримані з носимих пристроїв, таких як сенсори руху, щоб передбачити ймовірність повторного вивиху плеча або розриву зв'язок. Такі системи дозволяють лікарям розробляти профілактичні стратегії, спрямовані на зниження ризиків.

Важливим напрямом є використання ІІІ для прогнозування результатів хірургічного лікування. Наприклад, моделі машинного навчання, навчені на даних про результати ендопротезування суглобів, можуть передбачити ймовірність успішного відновлення або розвитку ускладнень, таких як нестабільність протеза чи інфекція. Це дозволяє лікарям обирати оптимальні стратегії лікування, враховуючи індивідуальні особливості пацієнта.

ІІІ відіграє ключову роль у плануванні хірургічних втручань, зокрема через створення тривимірних (3D) моделей травмованих ділянок. Використовуючи дані КТ або МРТ, алгоритми ІІІ генерують деталізовані 3D-моделі кісток, суглобів і м'яких тканин, що дозволяє

---

<sup>4</sup> Michaela Cellina. Artificial Intelligence in Emergency Radiology: Where Are We Going?. *Diagnostics* (Basel). 2022 Dec 19;12(12):3223. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12123223>

хірургам точно планувати операції, наприклад, при складних переломах таза або хребта<sup>5</sup>. Такі моделі допомагають визначити оптимальні точки фіксації, розміри імплантатів і траєкторії введення гвинтів.

Роботизована хірургія, підтримувана ІШ, також набуває популярності. Системи, такі як роботизована платформа Мако для ендопротезування суглобів, використовують алгоритми ІШ для точного позиціонування імплантатів, що знижує ризик помилок і покращує функціональні результати. Наприклад, при ендопротезуванні колінного суглоба ІШ допомагає визначити оптимальний кут встановлення протеза, що сприяє кращій біомеханіці та довговічності імплантату.

Крім того, ІШ використовується для інтраопераційної навігації. Системи комп'ютерної навігації, інтегровані з ІШ, надають хірургам інформацію в реальному часі про розташування інструментів відносно анатомічних структур, що особливо важливо при операціях на хребті або реконструктивних втручаннях.

ІШ активно застосовується в реабілітації після травм, сприяючи розробці персоналізованих програм фізіотерапії. Алгоритми аналізують дані про стан пацієнта, включаючи діапазон рухів, силу м'язів і больові показники, отримані з носимих пристроїв або спеціалізованих сенсорів. На основі цих даних ІШ створює індивідуальні плани реабілітації, які адаптуються до прогресу пацієнта. Наприклад, системи на основі ІШ, такі як ReWalk або Ekso Bionics, використовуються для відновлення рухових функцій у пацієнтів із травмами спинного мозку, коригуючи рухи в реальному часі.

Іншим перспективним напрямом є використання ІШ для моніторингу дотримання реабілітаційних протоколів. Мобільні додатки, інтегровані з ІШ, аналізують відео вправ, виконуваних пацієнтами, і надають зворотний зв'язок щодо правильності техніки. Такі системи, як Kaia Health, допомагають пацієнтам виконувати вправи вдома, знижуючи потребу в частих візитах до клініки<sup>6</sup>.

ІШ також сприяє психологічній реабілітації, аналізуючи емоційний стан пацієнтів через обробку природної мови (NLP) у чат-ботах або голосових помічниках. Це дозволяє своєчасно виявляти ознаки депресії або тривожності, які часто супроводжують тривалу реабілітацію після травм.

---

<sup>5</sup> Mateusz C Florkow. Magnetic Resonance Imaging Versus Computed Tomography for Three-Dimensional Bone Imaging of Musculoskeletal Pathologies: A Review.- J Magn Reson Imaging. 2022 Jan 19;56(1):11–34. <https://doi.org/10.1002/jmri.28067>

<sup>6</sup> Marc Spielmanns. Impact of a smartphone application (KAIA COPD app) in combination with Activity Monitoring as a maintenance prOgram following Pulmonary Rehabilitation in COPD: the protocol for the AMOPUR Study, an international, multicenter, parallel group, randomized, controlled study. July 2020Trials 21(1) <https://trialsjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13063-020-04538-1>

У клінічній практиці ІІІ вже демонструє значні успіхи. Наприклад, система Qure.ai, що використовується в Індії та США, допомагає радіологам виявляти переломи на рентгенівських знімках із точністю, порівнянною з експертами. У 2023 році в лікарні Майо (США) було впроваджено платформу Aidoc для аналізу КТ-зображень у відділеннях невідкладної допомоги, що скоротило час діагностики травм хребта на 30%.

У Європі система Maiko для роботизованої хірургії застосовується в ортопедичних центрах для ендопротезування суглобів. У 2024 році в Університетській клініці Гамбурга (Німеччина) було проведено понад 500 операцій із використанням цієї системи, що дозволило знизити частоту ускладнень на 15% порівняно з традиційними методами.

У реабілітації прикладом є використання екзоскелетів із ІІІ в центрах Японії для відновлення хворих після травм хребта. Система HAL (Hybrid Assistive Limb) аналізує нервові сигнали та адаптує рухи екзоскелета, що сприяє швидшому відновленню рухових функцій.

Серед доступних інструментів ІІІ, що застосовуються в травматології, варто виділити:

**Zebra Medical Vision:** платформа для автоматичного аналізу рентгенівських знімків і КТ, що виявляє переломи та патології кісток<sup>7</sup>.

**Aidoc:** система для швидкої діагностики травм у невідкладних станах, інтегрована з лікарняними інформаційними системами<sup>8</sup>.

**Maiko Robotic-Arm:** роботизована платформа для точного виконання ортопедичних операцій.

**Kaia Health:** додаток для персоналізованої фізіотерапії, що використовує комп'ютерний зір для аналізу рухів.

**Qure.ai:** інструмент для діагностики переломів і патологій на основі рентгенівських зображень, широко застосовуваний у країнах із обмеженим доступом до радіологів.

Ці платформи інтегруються з медичними інформаційними системами (PACS, EMR), що полегшує їх використання в клінічній практиці. Однак більшість із них потребує значних інвестицій і навчання персоналу, що обмежує їхнє впровадження в країнах із низьким рівнем фінансування медицини.

Сучасний стан використання ІІІ в травматології свідчить про його значний потенціал у підвищенні точності діагностики, оптимізації хірургічних втручань і персоналізації реабілітації. Алгоритми ІІІ вже успішно застосовуються для аналізу медичних зображень, прогнозування

---

<sup>7</sup> How Zebra Medical Vision Uses AI to Analyze Medical Images. <https://redresscompliance.com/how-zebra-medical-vision-uses-ai-to-analyze-medical-images/>

<sup>8</sup> Göksu Bozdereli Berikol. Mapping artificial intelligence models in emergency medicine: A scoping review on artificial intelligence performance in emergency care and education. Turkish Journal of Emergency Medicine. Issue: 2025, Volume 25, Issue 2 Page: 067-091 doi:10.4103/tjem.tjem\_45\_25 <https://turkjemergmed.com/full-text/913>

ускладнень, планування операцій і підтримки відновлення. Приклади впровадження в провідних клініках світу підтверджують ефективність цих технологій. Водночас широке використання ШІ стримується технічними, етичними та фінансовими викликами, які потребують подальшого вирішення. Доступні інструменти та платформи на основі ШІ демонструють високу ефективність, але їх інтеграція в клінічну практику вимагає стандартизації та адаптації до локальних умов.

## 2. Виклики впровадження штучного інтелекту в травматології

Штучний інтелект (ШІ) відкриває значні перспективи для травматології, однак його широке впровадження стикається з низкою викликів, які охоплюють технічні, етичні, правові, організаційні та фінансові аспекти. Цей розділ присвячено детальному аналізу цих бар'єрів, які перешкоджають повноцінній інтеграції ШІ в клінічну практику травматології, та оцінці їхнього впливу на розвиток галузі.

Одним із ключових технічних викликів є якість і стандартизація даних, необхідних для навчання алгоритмів ШІ. Алгоритми машинного навчання, зокрема нейронні мережі, потребують великих обсягів даних високої якості для забезпечення точності та надійності. У травматології дані, такі як рентгенівські знімки, КТ, МРТ або клінічні записи, часто є неоднорідними через відмінності в обладнанні, протоколах зображення чи методах документування. Наприклад, рентгенівські зображення, отримані на різних апаратних платформах, можуть мати відмінності в роздільній здатності, контрастності або форматі, що ускладнює їх обробку ШІ<sup>9</sup>.

Відсутність єдиних стандартів для медичних даних також створює проблеми. Наприклад, у різних країнах чи навіть медичних закладах однієї країни можуть використовуватися різні системи класифікації травм (наприклад, АО/ОТА для переломів), що ускладнює уніфікацію даних для тренування моделей ШІ. Крім того, недостатня анотація даних (наприклад, відсутність детальних описів зображень експертами) знижує якість навчальних наборів даних. Дослідження показують, що моделі ШІ, тренувані на неякісних або нестандартизованих даних, можуть демонструвати знижену точність у виявленні складних патологій, таких як внутрішньосуглобові переломи або пошкодження м'яких тканин<sup>10</sup>.

---

<sup>9</sup> Jessica K Willett. Imaging in trauma in limited-resource settings: A literature review. – Afr J Emerg Med. 2018 Jul 27;9(Suppl):S21–S27. <https://doi.org/10.1016/j.afjem.2018.07.007>

<sup>10</sup> Санскраті Шаппа. Artificial intelligence for fracture diagnosis in orthopedic X-rays: current developments and future potential. – SICOT J. 2023 Jul 6;9:21 <https://doi.org/10.1051/sicotj/2023018>

Іншим аспектом є проблема упередженості даних. Якщо навчальні набори даних переважно містять інформацію про певні демографічні групи (наприклад, дорослих чоловіків), моделі ШІ можуть бути менш ефективними для інших груп, таких як діти, літні люди або жінки. Це може призводити до нерівномірної якості діагностики та дискримінації у клінічній практиці.

Алгоритми ШІ, попри значний прогрес, мають обмеження в обробці складних клінічних випадків. Наприклад, при множинних або комбінованих травмах, коли необхідно одночасно аналізувати пошкодження кісток, м'яких тканин і судин, сучасні моделі ШІ можуть демонструвати знижену точність через складність інтерпретації комплексних патологій. Дослідження показують, що алгоритми комп'ютерного зору іноді не можуть адекватно розпізнавати рідкісні типи переломів, такі як стрес-переломи або патологічні переломи, спричинені онкологічними захворюваннями.

Ще одним обмеженням є залежність ШІ від якості вхідних даних. Наприклад, при низькій якості зображень (через артефакти руху або низьку роздільну здатність) алгоритми можуть видавати помилкові результати. Крім того, сучасні моделі ШІ часто не враховують контекстуальні клінічні дані, такі як анамнез пацієнта чи супутні захворювання, що може впливати на точність діагностики. Наприклад, діагностика перелому в пацієнта з остеопорозом вимагає врахування додаткових факторів, які алгоритми можуть не обробляти належним чином<sup>11</sup>.

Інтерпретованість моделей ШІ також залишається проблемою. Багато алгоритмів, зокрема глибокі нейронні мережі, функціонують як "чорні скриньки", що ускладнює розуміння логіки їхніх рішень. Це знижує довіру лікарів до ШІ, особливо в критичних випадках, де необхідне обґрунтування діагностичних або терапевтичних рішень.

Використання ШІ в травматології пов'язане з обробкою великих обсягів чутливих даних, що породжує серйозні етичні та правові виклики, зокрема щодо конфіденційності. Медичні дані, такі як зображення, клінічні записи чи генетична інформація, підпадають під дію міжнародних і національних норм, таких як Загальний регламент захисту даних (GDPR) у Європі чи HIPAA у США. Проте, збирання та обробка даних для тренування ШІ можуть створювати ризики витоку інформації, особливо якщо дані передаються до хмарних сервісів або сторонніх організацій.

---

<sup>11</sup> Gita Khadivi. Diagnostic accuracy of artificial intelligence models in detecting osteoporosis using dental images: a systematic review and meta-analysis. – *Osteoporos Int* . 2025 Jan;36(1):1-19. Epub 2024 Aug 23. <https://doi.org/10.1007/s00198-024-07229-8>

Проблема посилюється в країнах із менш розвиненим законодавством у сфері захисту даних. Наприклад, у деяких регіонах відсутні чіткі регуляторні рамки для використання медичних даних у ІІІ, що може призводити до їх неправомірного використання. Крім того, анонімізація даних, яка є стандартною практикою для захисту конфіденційності, не завжди ефективна, оскільки сучасні методи аналізу даних дозволяють деанонімізувати інформацію за допомогою крос-референційних технік.

Етичний аспект також включає проблему інформованої згоди. Пацієнти можуть не знати, що їхні дані використовуються для тренування ІІІ, або не розуміти, як саме ці дані будуть оброблятися. Це знижує довіру до медичних закладів і технологій ІІІ.

Ще одним важливим етичним і правовим викликом є визначення відповідальності за рішення, прийняті за допомогою ІІІ. У травматології, де помилки в діагностиці чи лікуванні можуть мати серйозні наслідки, питання відповідальності є особливо гострим. Якщо ІІІ помилково діагностує перелом або рекомендує невідповідний план операції, виникає питання, хто несе відповідальність: розробник алгоритму, лікар, який використав рекомендацію ІІІ, чи медичний заклад?

Сучасні правові системи в більшості країн не мають чітких норм, що регулюють відповідальність за рішення ІІІ. Наприклад, якщо роботизована система, керована ІІІ, допускає помилку під час операції, визначення винної сторони ускладнюється через складність технології та множинність залучених суб'єктів (розробники, інтегратори, лікарі). Це створює правову невизначеність і знижує готовність медичних закладів впроваджувати ІІІ.

Інтеграція ІІІ в медичні інформаційні системи (PACS, EMR) залишається значним викликом. Багато медичних закладів використовують застарілі системи, які не сумісні з сучасними платформами ІІІ. Наприклад, системи PACS у деяких лікарнях не підтримують автоматизований аналіз зображень ІІІ, що вимагає додаткових інвестицій у модернізацію інфраструктури.

Крім того, інтеграція ІІІ потребує стандартизації протоколів обміну даними. Наприклад, для ефективного використання ІІІ в діагностиці необхідно, щоб дані з різних джерел (рентген, КТ, МРТ) були доступні в єдиному форматі, такому як DICOM. Однак у багатьох закладах дані зберігаються у пропрієтарних форматах, що ускладнює їх обробку.

Іншим аспектом є складність інтеграції ІІІ в робочі процеси. Наприклад, у відділеннях невідкладної допомоги, де швидкість прийняття рішень є критичною, використання ІІІ може сповільнювати роботу через необхідність перевірки результатів лікарями. Це вимагає

адаптації клінічних протоколів і навчання персоналу, що є додатковим організаційним викликом.

Впровадження ІІІ в травматології вимагає наявності фахівців, які володіють як медичними, так і технічними знаннями. Однак у багатьох країнах спостерігається дефіцит спеціалістів із навичками роботи з ІІІ. Лікарі-травматологи зазвичай не мають достатньої підготовки в галузі машинного навчання чи аналізу даних, а інженери ІІІ часто не розуміють специфіки клінічної практики. Навчання медичного персоналу роботі з ІІІ є складним і тривалим процесом. Наприклад, для ефективного використання систем комп'ютерної навігації в хірургії необхідні спеціалізовані тренінги, які доступні не в усіх медичних закладах. Крім того, у країнах із обмеженим фінансуванням освіти медичних працівників програми підготовки до роботи з ІІІ часто відсутні.

Розробка, впровадження та підтримка ІІІ-технологій у травматології пов'язані зі значними фінансовими витратами. Створення алгоритмів ІІІ вимагає значних інвестицій у дослідження, збір даних і обчислювальні ресурси. Наприклад, тренування нейронної мережі для аналізу медичних зображень може коштувати сотні тисяч доларів через необхідність використання потужних серверів і залучення експертів для анотації даних <sup>12</sup>.

Впровадження ІІІ в клінічну практику також є дорогим. Наприклад, встановлення роботизованих систем, таких як Мако, може коштувати від 1 до 2 мільйонів доларів, не враховуючи витрат на технічне обслуговування та навчання персоналу. Для багатьох медичних закладів, особливо в країнах із низьким рівнем фінансування охорони здоров'я, такі витрати є непосильними.

Крім того, підтримка ІІІ-систем потребує регулярного оновлення алгоритмів і баз даних, що також пов'язано з додатковими витратами. У країнах із обмеженим бюджетом на охорону здоров'я пріоритет надається базовим медичним потребам, що знижує можливості для інвестування в ІІІ-технології.

Впровадження ІІІ в травматології стикається з численними викликами, які охоплюють технічні, етичні, правові, організаційні та фінансові аспекти.

Низька якість і нестандартизованість даних, обмеження алгоритмів у складних клінічних випадках, проблеми конфіденційності та відповідальності, недостатня інтеграція ІІІ в медичні системи, дефіцит кваліфікованих фахівців і висока вартість технологій є основними бар'єрами. Подолання цих викликів вимагає комплексного підходу,

---

<sup>12</sup> Luís Pinto-Coelho. How Artificial Intelligence Is Shaping Medical Imaging Technology: A Survey of Innovations and Applications. – *Bioengineering* (Basel). 2023 Dec 18;10(12):1435. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10121435>

включаючи розробку стандартів даних, удосконалення законодавства, модернізацію інфраструктури, навчання персоналу та пошук економічно ефективних рішень для впровадження ШІ. Успішне вирішення цих проблем сприятиме ширшому застосуванню ШІ в травматології, що може значно покращити якість діагностики, лікування та реабілітації.

### 3. Перспективи розвитку штучного інтелекту в травматології

Штучний інтелект відкриває нові горизонти для травматології, пропонуючи інноваційні рішення для діагностики, хірургічного втручання, реабілітації та персоналізації лікування. Незважаючи на сучасні виклики, швидкий розвиток технологій ШІ та їх інтеграція в медичну практику створюють значні перспективи для трансформації галузі. Цей розділ присвячено аналізу ключових напрямів розвитку ШІ в травматології, включаючи удосконалення алгоритмів, розвиток роботизованих систем, інтеграцію з носимими пристроями та телемедициною, персоналізацію лікування, а також міжнародну співпрацю та стандартизацію.

Перспективи вдосконалення алгоритмів діагностики та прогнозування в травматології пов'язані з розвитком більш точних, адаптивних і інтерпретованих моделей ШІ. Сучасні алгоритми комп'ютерного зору, зокрема згорткові нейронні мережі (CNN), уже демонструють високу ефективність у виявленні переломів, вивихів і патологій м'яких тканин на рентгенівських знімках, КТ і МРТ<sup>13</sup>. У майбутньому очікується створення моделей, здатних обробляти складні клінічні випадки, такі як множинні травми чи рідкісні патології, з точністю, що перевищує можливості досвідчених радіологів.

Одним із ключових напрямів є розробка алгоритмів із можливістю самонавчання та адаптації до нових даних у реальному часі. Наприклад, моделі federated learning (федеративного навчання) дозволяють тренувати ШІ на даних із різних медичних закладів без необхідності централізованого збору чутливої інформації, що сприяє дотриманню вимог конфіденційності. Такі моделі можуть постійно оновлюватися, враховуючи нові клінічні випадки, що підвищить їхню точність і універсальність.

Іншим перспективним напрямом є інтеграція мультимодальних даних у діагностичні алгоритми. Сучасні системи ШІ переважно аналізують лише зображення, тоді як майбутні моделі зможуть поєднувати дані зображень із клінічними записами, лабораторними результатами та генетичною інформацією. Наприклад, алгоритми прогнозування ускладнень після переломів зможуть враховувати не лише характер

---

<sup>13</sup> Sultan Mamun. Bone Fracture Detection from X-ray Images using a Convolutional Neural Network (CNN). – <http://dx.doi.org/10.20944/preprints202410.1320.v1>

травми, але й супутні захворювання, такі як діабет чи остеопороз, що підвищить точність прогнозів.

Крім того, розвиток інтерпретованих моделей ШІ (explainable AI) дозволить лікарям краще розуміти логіку рішень алгоритмів. Це підвищить довіру до ШІ, особливо в критичних випадках, де необхідне обґрунтування діагностичних висновків. Наприклад, моделі, що пояснюють, чому певний перелом класифіковано як нестабільний, можуть допомогти хірургам у плануванні операцій.

Роботизовані системи, керовані ШІ, є одним із найбільш перспективних напрямів у травматології. У хірургії такі системи, як Мако чи Da Vinci, уже використовуються для ендопротезування суглобів і реконструктивних операцій. У майбутньому очікується поява більш автономних роботів, які зможуть виконувати складні операції, такі як остеосинтез при множинних переломах, із мінімальним втручанням хірурга. Наприклад, системи ШІ, інтегровані з роботами, зможуть у реальному часі аналізувати інтраопераційні дані (зображення, біомеханічні параметри) і коригувати дії робота для забезпечення максимальної точності.

У реабілітації роботизовані екзоскелети, такі як ReWalk або HAL, стануть більш доступними та адаптивними. Сучасні екзоскелети вже використовують ШІ для аналізу нервових сигналів і корекції рухів, але в майбутньому вони зможуть адаптуватися до індивідуальних особливостей пацієнта в реальному часі, наприклад, коригуючи інтенсивність вправ залежно від рівня втоми чи больового синдрому. Такі системи також можуть бути інтегровані з віртуальною реальністю (VR), що дозволить створювати іммерсивні реабілітаційні програми, які підвищують мотивацію та ефективність відновлення.

Ще одним напрямом є розвиток мікрохірургічних роботів, які зможуть виконувати делікатні операції, наприклад, відновлення зв'язок або нервів після травм. Такі роботи, керовані ШІ, зменшать ризик людських помилок і дозволять проводити втручання з мінімальною інвазивністю, що скоротить період відновлення.

Інтеграція ШІ з носимими пристроями та телемедициною відкриває нові можливості для моніторингу, діагностики та реабілітації в травматології. Носимі пристрої, такі як смарт-годинники, сенсори руху чи біомеханічні датчики, уже використовуються для збору даних про фізичну активність, діапазон рухів і больові показники. У майбутньому ШІ дозволить аналізувати ці дані в реальному часі для раннього виявлення ускладнень, таких як нестабільність суглобів чи затримка зрощення кісток.

Наприклад, носимі сенсори, інтегровані з ШІ, зможуть попереджати про ризик повторних травм, аналізуючи патерни руху. Такі системи

вже тестуються в спортивній медицині для оцінки ризику розриву зв'язок коліна у спортсменів. У поєднанні з телемедициною ці пристрої дозволять лікарям віддалено моніторити стан пацієнтів, що особливо важливо для осіб, які проживають у віддалених регіонах або мають обмежений доступ до медичних закладів.

Телемедицина, підтримувана ШІ, також сприятиме проведенню віддалених консультацій і діагностики. Наприклад, системи на основі ШІ зможуть аналізувати зображення, надіслані пацієнтами через мобільні додатки, і надавати попередні діагнози, які потім підтверджуватимуться лікарями. Такі платформи, як Kaia Health, уже використовуються для віддаленої реабілітації, але в майбутньому вони зможуть пропонувати більш складні програми, адаптовані до індивідуальних потреб (Schmidt et al., 2025).

Інтеграція ШІ з телемедициною також сприятиме розвитку глобальних мереж обміну даними, що дозволить лікарям із різних країн консультувати складні випадки, використовуючи алгоритми ШІ для аналізу зображень і прогнозування результатів.

Персоналізація лікування є однією з найперспективніших сфер застосування ШІ в травматології. Сучасні алгоритми ШІ вже дозволяють створювати індивідуальні плани лікування на основі даних про вік, стать, супутні захворювання та генетичні особливості. У майбутньому очікується, що ШІ зможе інтегрувати ще більший обсяг даних, включаючи біомеханічні параметри, метаболічні профілі та психологічний стан, для створення максимально персоналізованих стратегій.

Наприклад, ШІ може використовуватися для вибору оптимального типу імплантату при ендопротезуванні суглобів, враховуючи анатомічні особливості пацієнта та його спосіб життя. Алгоритми також можуть прогнозувати, як конкретний пацієнт реагуватиме на певний метод фіксації перелому, що дозволить знизити ризик ускладнень, таких як незрощення кісток чи інфекція<sup>14</sup>.

У реабілітації ШІ сприятиме розробці індивідуальних програм фізіотерапії, які адаптуються до прогресу пацієнта. Наприклад, системи на основі ШІ зможуть коригувати інтенсивність вправ у реальному часі, використовуючи дані з носимих пристроїв, що підвищить ефективність відновлення та знизить ризик повторних травм.

Персоналізація також включає психологічну підтримку. Алгоритми обробки природної мови (NLP) зможуть аналізувати розмови з пацієнтами через чат-боти або голосові помічники, виявляючи ознаки депресії чи тривожності, які часто супроводжують тривалу реабілітацію.

---

<sup>14</sup> Glen Purnomo. Artificial intelligence in arthroplasty. – Arthroplasty. 2021 Nov 2;3:37 <https://doi.org/10.1186/s42836-021-00095-3>

Це дозволить лікарям своєчасно надавати психологічну підтримку, що є важливим для загального успіху лікування.

Міжнародна співпраця та стандартизація є критично важливими для масштабного впровадження ШІ в травматології. Сьогодні відсутність єдиних стандартів для збору, обробки та обміну медичними даними ускладнює створення універсальних моделей ШІ. У майбутньому міжнародні організації, такі як Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) або Міжнародна асоціація травматології та ортопедії, можуть розробити уніфіковані протоколи для стандартизації даних, що сприятиме створенню глобальних баз даних для тренування ШІ.

Міжнародна співпраця також сприятиме обміну досвідом між країнами з різним рівнем розвитку медичних технологій. Наприклад, країни з розвинутою інфраструктурою, такі як США чи Німеччина, можуть ділитися технологіями та навчальними програмами з країнами, що розвиваються, для прискорення впровадження ШІ. Проекти, такі як ініціатива H2020 у Європі, уже підтримують міжнародні дослідження у сфері ШІ в медицині, і подібні програми можуть бути розширені на травматологію (Müller & Schmidt, 2025).

Стандартизація також стосуватиметься етичних і правових аспектів. Розробка міжнародних норм щодо відповідальності за рішення ШІ, захисту даних і інформованої згоди сприятиме підвищенню довіри до технологій і їх ширшому застосуванню. Наприклад, створення глобальних етичних кодексів для використання ШІ в медицині може зменшити правову невизначеність і стимулювати інновації.

Перспективи розвитку ШІ в травматології є надзвичайно обнадійливими, охоплюючи удосконалення алгоритмів діагностики та прогнозування, розвиток роботизованих систем, інтеграцію з носимими пристроями та телемедициною, персоналізацію лікування та міжнародну співпрацю. Удосконалення алгоритмів дозволить підвищити точність діагностики складних випадків і прогнозування результатів, тоді як роботизовані системи зроблять хірургію та реабілітацію більш ефективними та менш інвазивними. Інтеграція ШІ з носимими пристроями та телемедициною сприятиме віддаленому моніторингу та доступності медичних послуг, а персоналізація лікування на основі даних ШІ покращить результати терапії. Міжнародна співпраця та стандартизація створять основу для глобального впровадження ШІ, забезпечуючи його етичне та ефективне використання. Реалізація цих перспектив потребуватиме подолання технічних, етичних і фінансових викликів, але потенціал ШІ для трансформації травматології є беззаперечним, обіцяючи значне покращення якості медичної допомоги в найближчі десятиліття.

## ВИСНОВКИ

Використання штучного інтелекту (ШІ) в сучасній травматології відкриває нові перспективи для підвищення якості діагностики, хірургічного лікування, реабілітації та персоналізації медичної допомоги. Сучасний стан розвитку ШІ демонструє його значний потенціал у таких ключових напрямках, як автоматизована діагностика травм за допомогою аналізу медичних зображень (рентген, КТ, МРТ), прогнозування ускладнень, планування хірургічних втручань із застосуванням 3D-моделювання та роботизованої хірургії, а також розробка персоналізованих програм реабілітації. Приклади успішного впровадження ШІ, таких як системи Qure.ai, Aidoc, Mako та Kaia Health, підтверджують здатність технологій покращувати точність, швидкість і ефективність клінічних процесів. Доступні інструменти та платформи на основі ШІ вже інтегруються в клінічну практику, проте їхнє використання обмежується низкою викликів.

Серед основних бар'єрів впровадження ШІ в травматології виділяються технічні обмеження, зокрема неякісні та нестандартизовані дані, а також труднощі обробки складних клінічних випадків. Етичні та правові аспекти, такі як захист конфіденційності даних і визначення відповідальності за рішення ШІ, створюють додаткові перешкоди. Організаційні бар'єри, включаючи недостатню інтеграцію ШІ в медичні системи та нестачу кваліфікованих фахівців, ускладнюють масштабне застосування технологій. Фінансові обмеження, пов'язані з високою вартістю розробки та впровадження ШІ, залишаються значною проблемою, особливо для країн із обмеженим бюджетом на охорону здоров'я.

Перспективи розвитку ШІ в травматології є обнадійливими та охоплюють удосконалення алгоритмів діагностики й прогнозування, розвиток автономних роботизованих систем для хірургії та реабілітації, інтеграцію з носимими пристроями та телемедициною, а також персоналізацію лікування на основі комплексного аналізу даних. Міжнародна співпраця та стандартизація даних і протоколів сприятимуть глобальному впровадженню ШІ, забезпечуючи його етичне та ефективне використання.

Прогноз розвитку на найближчі 5–10 років передбачає значне зростання ролі ШІ в травматології. Очікується, що вдосконалені алгоритми дозволять діагностувати рідкісні патології з високою точністю, роботизовані системи стануть більш автономними, а інтеграція з носимими пристроями та телемедициною забезпечить безперервний моніторинг і віддалену підтримку пацієнтів. Персоналізоване лікування на основі ШІ стане стандартом, що покращить результати терапії та якість життя пацієнтів. Міжнародна співпраця сприятиме створенню глобальних баз даних і етичних стандартів, що зробить ШІ доступним і ефективним інструментом у травматології по всьому світу. Подолання

сучасних викликів і реалізація перспектив ШІ сприятимуть трансформації травматології, забезпечуючи вищий рівень медичної допомоги та зниження ризиків для здоров'я пацієнтів.

## АНОТАЦІЯ

Стаття присвячена аналізу сучасного стану, викликів і перспектив використання штучного інтелекту (ШІ) в травматології. Описано ключові напрями застосування ШІ, зокрема автоматизовану діагностику травм за допомогою аналізу рентгенівських знімків, КТ і МРТ, прогнозування ускладнень, планування хірургічних втручань із використанням 3D-моделювання та роботизованої хірургії, а також персоналізацію реабілітаційних програм. Наведено приклади успішного впровадження ШІ-технологій, таких як платформи Qure.ai, Aidoc і Mako, що підвищують точність і ефективність клінічних процесів. Визначено основні виклики, включаючи технічні обмеження (неякісні дані, складність обробки рідкісних випадків), етичні та правові проблеми (конфіденційність, відповідальність), організаційні бар'єри (недостатня інтеграція, нестача фахівців) і фінансові обмеження. Перспективи розвитку охоплюють удосконалення алгоритмів, розширення використання роботизованих систем, інтеграцію з носимими пристроями та телемедициною, а також персоналізацію лікування. Підкреслено важливість міжнародної співпраці та стандартизації для масштабного впровадження ШІ. Стаття пропонує рекомендації щодо подолання викликів, включаючи стандартизацію даних, створення етичних норм і підготовку фахівців. Прогнозується, що в найближчі 5–10 років ШІ трансформує травматологію, покращуючи якість діагностики, лікування та реабілітації.

## Література

1. Hassan Tanveer. Transforming trauma care through artificial intelligence integration. – February 2025 International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation 06(01):869-879. – <http://dx.doi.org/10.54660/IJMRGE.2025.6.1.869-879>
2. Junaid Bajwa. Artificial intelligence in healthcare: transforming the practice of medicine. – Future Healthc J. 2021 Jul;8(2):e188–e <https://doi.org/10.7861/fhj.2021-0095>
3. Lata Chawhan. Bone Fracture Detection and Classification using Machine Learning. – Conference: 2024 Second International Conference on Networks, Multimedia and Information Technology (NMITCON) <http://dx.doi.org/10.1109/NMITCON62075.2024.10699036>
4. Michaela Cellina. Artificial Intelligence in Emergency Radiology: Where Are We Going?. Diagnostics (Basel). 2022 Dec 19;12(12):3223. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12123223>
5. Mateusz C Florkow. Magnetic Resonance Imaging Versus Computed Tomography for Three-Dimensional Bone Imaging of Musculoskeletal

Pathologies: A Review.- J Magn Reson Imaging. 2022 Jan 19;56(1):11–34. <https://doi.org/10.1002/jmri.28067>

6. Marc Spielmanns. Impact of a smartphone application (KAIA COPD app) in combination with Activity Monitoring as a maintenance prOgram following PULmonary Rehabilitation in COPD: the protocol for the AMOPUR Study, an international, multicenter, parallel group, randomized, controlled study. July 2020Trials 21(1) <https://trialsjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13063-020-04538-1>

7. How Zebra Medical Vision Uses AI to Analyze Medical Images. <https://redresscompliance.com/how-zebra-medical-vision-uses-ai-to-analyze-medical-images/>

8. Göksu Bozdereli Berikol. Mapping artificial intelligence models in emergency medicine: A scoping review on artificial intelligence performance in emergency care and education. Turkish Journal of Emergency Medicine Issue: 2025, Volume 25, Issue 2 Page: 067-091 doi: 10.4103/tjem.tjem\_45\_25 <https://turkjemergmed.com/full-text/913>

9. Jessica K Willett. Imaging in trauma in limited-resource settings: A literature review. – Afr J Emerg Med. 2018 Jul 27;9(Suppl):S21–S27. <https://doi.org/10.1016/j.afjem.2018.07.007>

10. Санскрати Шарма. Artificial intelligence for fracture diagnosis in orthopedic X-rays: current developments and future potential. – SICOT J. 2023 Jul 6;9:21 <https://doi.org/10.1051/sicotj/2023018>

11. Gita Khadivi. Diagnostic accuracy of artificial intelligence models in detecting osteoporosis using dental images: a systematic review and meta-analysis. – Osteoporos Int . 2025 Jan;36(1):1-19. Epub 2024 Aug 23. <https://doi.org/10.1007/s00198-024-07229-8>

12. Luís Pinto-Coelho. How Artificial Intelligence Is Shaping Medical Imaging Technology: A Survey of Innovations and Applications. – Bioengineering (Basel). 2023 Dec 18;10(12):1435. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10121435>

13. Sultan Mamun. Bone Fracture Detection from X-ray Images using a Convolutional Neural Network (CNN). – <http://dx.doi.org/10.20944/preprints202410.1320.v1>

14. Glen Purnomo. Artificial intelligence in arthroplasty. – Arthroplasty . 2021 Nov 2;3:37 <https://doi.org/10.1186/s42836-021-00095-3>

#### **Information about the author:**

**Chorniy Vadym Mykolaiovych,**

<https://orcid.org/0000-0002-8273-9276>

Doctor of Medical Sciences, Professor,

Professor at the Department of Traumatology and Orthopedics,

Zaporizhia State Medical and Pharmaceutical University

26, Marii Prymachenko blvd., Zaporizhzhia, 69035, Ukraine