

**ІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ МЕДИЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені О.О.БОГОМОЛЬЦЯ**

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ГРОМАДСЬКОГО ЗДОРОВ'Я ТА ПРОФІЛАКТИЧНОЇ
МЕДИЦИНИ**

КАФЕДРА МЕНЕДЖМЕНТУ ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я

Кваліфікаційна робота магістра

**НА ТЕМУ «ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В
ДОПОМІЖНИХ РЕПРОДУКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ ТА
ЛІКУВАННІ БЕЗПЛІДДЯ»**

Студента групи 14401 БМН,
спеціальності 073 «Менеджмент»
ОПП «Менеджмент у сфері
охорони здоров'я »

Галина СТРЕЛКО

Науковий керівник
науковий ступінь,
вчене звання

Вадим ТЕРЕНТЮК,
к.мед.наук, доцент

Гарант освітньо-
професійної програми
науковий ступінь
вчене звання

Ганна МАТУКОВА,
д.пед.н., професор

Завідувач кафедри,
науковий ступінь
вчене звання

Валентин ПАРІЙ,
д.мед.н, провесор

Київ, 2025

МІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ МЕДИЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені О.О.БОГОМОЛЬЦЯ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ГРОМАДСЬКОГО ЗДОРОВ'Я ТА ПРОФІЛАКТИЧНОЇ МЕДИЦИНИ
КАФЕДРА МЕНЕДЖМЕНТУ ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я

Освітній рівень

магістр

Спеціальність

073 «Менеджмент»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри менеджменту
охорони здоров'я

_____ 20__ року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

1. Визначити та проаналізувати сучасну роль ДРТ (ЕКЗ/ІКСІ) у демографічних процесах та їхній потенційний вплив на біологічні та епігенетичні аспекти здоров'я потомства.
2. Описати ключові теоретичні та методологічні засади ШІ (машинне та глибоке навчання) та їхню еволюцію як інструменту підтримки клінічних рішень у медицині.
3. Детально проаналізувати клінічні напрямки застосування ШІ в ДРТ, включаючи:
 - Персоналізацію та прогнозування результатів контрольованої стимуляції яєчників (КСЯ).
 - Селекцію ембріонів (морфологічний аналіз, прогнозування еуплоїдності та потенціалу імплантації).
 - Автоматизовану оцінку якості гамет (сперматозоїдів та ооцитів).
 - Прогнозування результатів лікування за допомогою ШІ
4. Сформулювати практичні рекомендації для менеджерів охорони здоров'я щодо стратегічного впровадження ШІ-рішень, управління даними (Big Data), забезпечення прозорості та навчання персоналу у практиці репродуктивних клінік.

1. **Тема роботи** _Застосування штучного інтелекту в допоміжних репродуктивних технологіях та лікуванні безпліддя

керівник роботи Терентюк В., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "13"травня 2025 р. №
381

2. Строк подання студентом роботи грудень 2025 року

3. Вихідні дані до роботи внутрішні матеріали клініки IVMED, нормативно-правова база у сфері медичних послуг та персоналізації, профільна наукова література щодо персоналізації та використання ШІ в допоміжних репродуктивних технологіях, практичний досвід, отриманий під час виробничої практики у IVMED.

4. Цільова установка кваліфікаційної роботи

Мета кваліфікаційної роботи

Проаналізувати сучасний стан, переваги та ризики застосування методів штучного інтелекту для підвищення клінічної ефективності, оптимізації управлінських рішень та вдосконалення показників якості у сфері допоміжних репродуктивних технологій та лікування безпліддя.

Об'єкт дослідження

Процес надання медичних послуг у сфері допоміжних репродуктивних технологій та лікування безпліддя.

Предмет дослідження

Застосування технологій штучного інтелекту як інноваційного інструменту для підвищення клінічної ефективності та операційного менеджменту в ДРТ.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

табл. 4, рис. 3

6. Дата видачі завдання "01" вересня 2025 р. _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Затвердження та надання теми роботи	травень 2025 р.	
2	Обґрунтування актуальності теми роботи	вересень 2025 р.	
3	Робота з бібліографічними джерелами, підготовка матеріалів для написання першого розділу роботи	вересень 2025 р.	
4	Надання матеріалів по першому розділу роботи	жовтень 2025 р.	
5	Збір інформації для написання другого розділу роботи	жовтень 2025 р.	
6	Надання матеріалів по другому розділу роботи	листопад 2025 р.	
7	Підготовка матеріалів та написання третього розділу роботи	листопад 2025 р.	

8	Надання матеріалів по третьому розділу роботи	листопад 2025 р.	
9	Написання висновків, заключне оформлення роботи та демонстраційних матеріалів	листопад 2025 р.	
10	Антиплагіатна перевірка роботи	грудень 2025 р.	
11	Підготовка доповіді до захисту роботи	грудень 2025 р.	

Студентка

_____ ГАЛИНА СТРЕЛКО

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи Вадим Терентюк

(підпис)

(прізвище)

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

АМГ – Антимюллерів гормон

ВКМ – Внутрішня клітинна маса

ГН – Глибоке навчання

ДРТ – Допоміжні репродуктивні технології

ЕКЗ – Екстракорпоральне запліднення

ІМТ – Індекс маси тіла

КСЯ – Контрольована стимуляція яєчників

МН – Машинне навчання

ПГД – Передімплантаційна генетична діагностика

СГЯ – Синдром гіперстимуляції яєчників

ТТЕ – Трофектодерма

ФСГ – Фолікулостимулюючий гормон

ШІ – Штучний інтелект

ICSI - інтрацитоплазматичної ін'єкції сперматозоїда

ERICA - Embryo Ranking Intelligent Classification Algorithm

SID – sperm ID

ЗМІСТ

№	Назва розділу	Сторінка
1.	ВСТУП	12
1.1.	Актуальність теми	12
1.2.	Біологічний та епігенетичний вплив ДРТ на потомство	12
1.3.	Концептуальні основи та еволюція штучного інтелекту в медицині	13
1.3.1.	Визначення та ключові підходи ШІ	13
1.3.2.	Еволюція ШІ від експертних систем до точної медицини	14
1.4.	Проблема Big Data та етичні аспекти впровадження ШІ в ДРТ	14
1.5.	Мета та завдання дослідження	15
1.5.1.	Мета роботи	15
1.5.2.	Завдання дослідження	16
1.6.	Об'єкт і предмет дослідження	16
1.7.	Структура роботи	16
2.	ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ОХОРОНІ ЗДОРОВ'Я	17
2.1.	Допоміжні репродуктивні технології (ДРТ) та штучний інтелект (ШІ)	17
2.2.	Наукова важливість питання	18

№	Назва розділу	Сторінка
2.3.	Основні тенденції та напрямки у застосуванні ІІІ в ДРТ	19
2.3.1.	Менеджерський аспект інтеграції ІІІ в клініку ДРТ	19
2.3.2.	Оцінка якості ооцитів	19
2.3.3.	Вибір ембріонів	20
2.3.4.	Селекція ембріонів: прогнозування еуплоїдності та імплантації	20
2.3.5.	Вибір сперматозоїдів для ІКСІ	21
2.3.6.	Оптимізація стимуляції яєчників	22
2.3.7.	Прогнозування результатів контрольованої стимуляції яєчників (КСЯ) та підбір стартової дози препаратів	23
2.3.8.	Прогнозування успішності ДРТ	24
2.3.9.	Приклад науково обґрунтованого прогнозу ймовірності настання вагітності в 1 циклі ЕКЗ - ІКСІ, базуючись на розрахунках за допомогою ІІІ	30
2.3.10.	Підсумкова частина	32
2.3.11.	Виявлені прогалини та обґрунтування необхідності дослідження	33
3.	МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ІІІ В РЕПРОДУКТИВНІЙ МЕДИЦИНІ	34
3.1.	Обґрунтування застосування ІІІ при первинному консультуванні	34
3.2.	Дизайн дослідження	36
3.3.	Збір даних	39

№	Назва розділу	Сторінка
3.4.	Процес побудови моделі	39
3.5.	Статистичні методи	39
4.	РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ	41
5.	ВИСНОВКИ	49
5.1.	Основні результати дослідження	49
5.2.	Практичні рекомендації для менеджменту охорони здоров'я	49
-	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	52

1. ВСТУП

1.1. Актуальність теми

Незважаючи на значний прогрес у галузі допоміжних репродуктивних технологій (ДРТ), зокрема екстракорпорального запліднення (ЕКЗ) та інтрацитоплазматичної ін'єкції сперматозоїда (ICSI), успішність програм протягом останнього десятиліття демонструє певну стагнацію, коливаючись у межах 30–40% настання вагітності. Такий рівень ефективності створює нагальну медичну, соціальну та економічну потребу в інноваційних підходах для підвищення клінічних результатів та оптимізації процесів лікування безпліддя. З огляду на зростаючу поширеність безпліддя у світі та його тісний зв'язок із демографічними процесами, ДРТ стали ключовою медичною послугою. У низці розвинених країн, де ЕКЗ є більш доступним або покривається страховкою, на нього припадає понад 5% усіх новонароджених, що підкреслює глибокий вплив технологій на суспільство та біологічну еволюцію людини [1].

Штучний інтелект (ШІ), що базується на машинному та глибокому навчанні, є технологічним проривом, здатним аналізувати величезні та складні масиви клінічних, ембріологічних та генетичних даних. Впровадження ШІ у сферу ДРТ має потенціал не лише для радикального підвищення ефективності лікування (наприклад, через точну селекцію ембріонів та персоналізацію протоколів), але й для оптимізації управлінських рішень у репродуктивних клініках. Для менеджменту охорони здоров'я це означає покращення операційної ефективності, зниження витрат на цикл лікування та підвищення конкурентоспроможності медичного закладу. Дослідження можливостей та стратегій інтеграції ШІ у цю високотехнологічну та критично важливу сферу медицини є питанням, що має першочергове значення.

1.2. Біологічний та епігенетичний вплив ДРТ на потомство

Використання ДРТ ставить нові питання щодо довгострокових біологічних наслідків. Людський вид стає біологічно залежним від власних технологій, оскільки репродукція все частіше відбувається поза природним контекстом, і межі віку та статі для неї розширюються.

- Фенотипічні зміни: Технологічні втручання можуть викликати фенотипічні зміни через епігенетичні механізми. Експресія генів у ранніх ембріонах, наприклад, залежить від середовища культивування *in vitro* [2], що впливає на подальший розвиток.
- Кріоконсервування: Процедура кріоконсервування ембріонів, що є рутинною практикою, асоціюється зі збільшенням ваги при народженні та вищою частотою народження дітей з великою вагою для гестаційного віку [3].
- Довгострокові ризики: Діти, народжені в результаті ЕКЗ, можуть мати невеликі зміни в кардіометаболічних показниках та гормональних рівнях, хоча ці зміни зазвичай є клінічно незначущими, вони вимагають подальшого моніторингу та досліджень [4].

1.3. Концептуальні основи та еволюція штучного інтелекту в медицині

1.3.1. Визначення та ключові підходи ШІ

Штучний інтелект (ШІ) — це широка галузь комп'ютерних наук, що займається створенням систем, здатних імітувати людський інтелект для виконання таких завдань, як навчання, вирішення проблем та розпізнавання образів.

- Машинне навчання (МН): Підхід ШІ, де система навчається на великих масивах даних (досвіді) та використовує статистичні методи для прогнозування або прийняття рішень без явного програмування для кожного конкретного випадку.

- Глибоке навчання (ГН): Підмножина МН, яка використовує штучні нейронні мережі з численними шарами (глибокі мережі) для обробки інформації. ГН є особливо ефективним для завдань, пов'язаних з аналізом зображень, таких як медична візуалізація та оцінка якості ембріонів.

1.3.2. Еволюція ШІ від експертних систем до точної медицини

Історія ШІ в медицині розпочалася у 1970–1980-х роках із експертних систем (наприклад, MYCIN), які використовували набори правил для діагностичної допомоги. Сучасний етап характеризується переходом до МН та ГН, що дозволяє:

- **Аналіз Big Data:** Обробка даних електронних медичних карток (ЕМК), геномних, протеомних та метаболомних даних.
- **Підтримка клінічних рішень (CDS):** Надання лікарям індивідуалізованих, доказових рекомендацій у реальному часі.
- **Точна медицина:** Розробка персоналізованих протоколів лікування та профілактики, що є особливо важливим для складної та варіативної сфери, як ДРТ.

1.4. Проблема Big Data та етичні аспекти впровадження ШІ в ДРТ

Успіх ШІ прямо залежить від якості та обсягу даних. Репродуктивні клініки генерують величезну кількість даних: зображення ооцитів, ембріонів (у реальному часі), клінічні показники пацієнтів, гормональні профілі, результати ПГТ-А (преімплантаційного генетичного тестування на анеуплоїдію).

- **Виклики Big Data:** Необхідність стандартизації форматів даних, забезпечення їхньої якості та усунення "шуму" для ефективного навчання алгоритмів [25].

- **Етичні аспекти:** Впровадження ШІ вимагає вирішення питань, пов'язаних із конфіденційністю пацієнтів, відповідальністю за діагностичні помилки (хто відповідає: лікар чи алгоритм?) та забезпеченням справедливості (уникнення упередженості ШІ через нерепрезентативні навчальні дані).

1.5. Мета та завдання дослідження

1.5.1. Мета роботи: Проаналізувати сучасний стан, переваги та ризики застосування методів штучного інтелекту для підвищення клінічної ефективності, оптимізації управлінських рішень та вдосконалення показників якості у сфері допоміжних репродуктивних технологій та лікування безпліддя.

1.5.2. Завдання дослідження:

1. Визначити та проаналізувати сучасну роль ДРТ (ЕКЗ/ІКСІ) у демографічних процесах та їхній потенційний вплив на біологічні та епігенетичні аспекти здоров'я потомства.
2. Описати ключові теоретичні та методологічні засади ШІ (машинне та глибоке навчання) та їхню еволюцію як інструменту підтримки клінічних рішень у медицині.
3. Детально проаналізувати клінічні напрямки застосування ШІ в ДРТ, включаючи:
 - a. Персоналізацію та прогнозування результатів контрольованої стимуляції яєчників (КСЯ).
 - b. Селекцію ембріонів (морфологічний аналіз, прогнозування еуплоїдності та потенціалу імплантації).
 - c. Автоматизовану оцінку якості гамет (сперматозоїдів та ооцитів).
4. Прогнозування результатів лікування за допомогою ШІ

5. Сформулювати практичні рекомендації для менеджерів охорони здоров'я щодо стратегічного впровадження ШІ-рішень, управління даними (Big Data), забезпечення прозорості та навчання персоналу у практиці репродуктивних клінік.

1.6. Об'єкт і предмет дослідження.

Об'єкт дослідження: Процес надання медичних послуг у сфері допоміжних репродуктивних технологій та лікування безпліддя.

Предмет дослідження: Застосування технологій штучного інтелекту як інноваційного інструменту для підвищення клінічної ефективності та операційного менеджменту в ДРТ.

1.7. Структура роботи

Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох основних розділів, висновків, списку використаних джерел.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ОХОРОНІ ЗДОРОВ'Я

2.1. Допоміжні репродуктивні технології (ДРТ) та штучний інтелект (ШІ)

Сучасна демографічна криза та зниження народжуваності в більшості країн світу сприяють підвищенню актуальності використання допоміжних репродуктивних технологій (ДРТ), зокрема екстракорпорального запліднення (ЕКЗ). У зв'язку із цим, зростає необхідність оптимізації процесів ДРТ з використанням новітніх інструментів, серед яких штучний інтелект (ШІ) стає ключовим. Крім того, стрімке зростання кількості ДРТ клінік а також кількість працівників, певний плин кадрів, визначають необхідність стандартизації процесів та незалежної оцінки певних зображень, знову ж таки, з метою стандартизації. Штучний інтелект (ШІ) - це комп'ютерні системи, які можуть виконувати завдання, що зазвичай вимагають людського інтелекту [22, 23, 24].

Поняття ШІ з'явилося в 1950-х роках, коли дослідники почали вивчати ідею створення машин, які могли б імітувати людські розумові процеси. Початковий фокус досліджень ШІ був спрямований на розробку символічних систем і міркувань на основі правил для вирішення проблем. У 1960-х і 1970-х роках штучний інтелект зазнав значного прогресу, включаючи розробку експертних систем, здатних імітувати людський досвід у певних галузях. Однак у 1980-х роках прогрес сповільнився через обмеження обчислювальних потужностей і брак адекватних алгоритмів. Наприкінці 1990-х - на початку 2000-х років спостерігалось пожвавлення досліджень у галузі штучного інтелекту, спричинене вдосконаленням алгоритмів машинного навчання та наявністю великих масивів даних.

Прориви в глибокому навчанні призвели до значного прогресу в комп'ютерній візуалізації, обробці зображень, прогнозуванні подій на основі

математичних моделей, обробці природної мови та розпізнаванні мовлення. Сьогодні ШІ найчастіше використовується в таких додатках, як віртуальні асистенти, рекомендаційні системи, автономні транспортні засоби тощо. З кожним роком розширюється застосування ШІ в медицині [22,25,29].

2.2 Наукова важливість питання

Відносно низька успішність ЕКЗ спонукає до пошуку нових рішень. ШІ пропонує перспективи підвищення ефективності на всіх етапах ДРТ, включаючи вибір ембріонів, сперматозоїдів, прогнозування плідності та персоналізацію лікування, прогнозування результатів лікування. Розвиток цих підходів може суттєво вплинути на загальну успішність репродуктивних технологій.

Ще один важливий аспект можливого застосування ШІ – аналіз великого масиву даних. Адже окремі втручання та маніпуляції в репродуктивній медицині можуть мати незначний, але важливий вплив на майбутні покоління. ЕКЗ також може викликати фенотипічні зміни за допомогою епігенетичних механізмів; експресія генів у ранніх ембріонах [38], швидкість внутрішньоутробного росту, експресія генів у плаценті, маса тіла новонароджених і маса тіла у віці 2 років залежать від середовища, що використовується для культивування ембріонів *in vitro* (Nelissen та ін., 2015; Kleijkers та ін., 2014, 2015). Ще одним прикладом фенотипових змін є те, що кріоконсервування ембріонів людини асоціюється зі збільшенням ваги при народженні та збільшенням частоти народження дітей з великою вагою для гестаційного віку (Pinborg et al., 2014; Wennerholm et al., 2023). ЕКЗ асоціюється зі змінами кардіометаболічних показників, складу жирової тканини, сироваткових рівнів гормонів і факторів росту, початком статевого дозрівання і довжини кісток у дітей і підлітків (Scherrer та ін., 2016). Різниця в досліджуваній популяції та в контрольній може складати не більше 1-2 %, і необхідно аналізувати велику кількість даних, що під силу ШІ і важко для реалізації без такого інструменту.

2.3 Основні тенденції та напрямки у застосуванні ШІ в ДРТ

2.3.1 Менеджерський аспект інтеграції ШІ в клініку ДРТ

Економічна ефективність та операційне управління неможливі без ретельного аналізу числених показників роботи медзакладу. ШІ може бути корисним в наступних сферах менеджерської діяльності:

- Зниження витрат на цикл, адже точна селекція ембріонів ШІ зменшує кількість необхідних переносів ембріонів для досягнення вагітності, що знижує загальні витрати клініки та пацієнта.
- Оптимізація роботи ембріолога завдяки автоматизації рутинних завдань (оцінка сперми, морфологія ембріонів) дозволяє ембріологам зосередитися на більш складних маніпуляціях (ІКСІ, біопсія), підвищуючи продуктивність лабораторії.
- Інвестиційні рішення, що необхідні для керівництва та стратегічних інвестицій в ШІ-платформи (тайм-лапс інкубатори з інтегрованим ШІ-аналізом), виходячи з розрахунку повернення інвестицій (ROI) через підвищення ЧНВ.
- Створення єдиної бази даних для навчання ШІ-алгоритмів клініки повинні впровадити системи збору, стандартизації та зберігання великих обсягів структурованих та неструктурованих даних (зображень).

2.3.2 Оцінка якості ооцитів

Якість ооцита є критичною характеристикою в програмах ДРТ та суттєво впливає на фінальний результат лікування пацієнтів. ШІ може аналізувати зображення веретена поділу ооцита (структури, яка відповідає за правильний поділ хромосом) для прогнозування його плідності. Використовуючи зображення з високою роздільною здатністю, алгоритми ГН можуть визначати, чи є веретено поділу нормальним, що безпосередньо корелює з

ризиком анеуплоїдії. На сьогодні подібні алгоритми тільки почали розроблятися в репродуктивній медицині.

2.3.3 Вибір ембріонів

ERICA (Embryo Ranking Intelligent Classification Algorithm) демонструє ефективність у передбаченні плоідності ембріонів та ймовірності імплантації, використовуючи базу з понад 15 000 зображень бластоцист. Точна оцінка життєздатності ембріонів є основним фактором у максимізації частоти настання вагітності та оптимізації лікування ЕКЗ [5]. У більшості випадків ембріологи відбирають ембріони або ооцити за допомогою неінвазивного дослідження, заснованого на візуальному спостереженні, зосередженому на морфології та динамічному розвитку на стадії бластоцисти. Оцінка ембріонів є суб'єктивною і, таким чином, може змінюватися від одного спостерігача до іншого, враховуючи існування систем оцінки ембріонів, а також досвід і знання ембріологів, що впливають на кінцевий результат. Впровадження автоматичного морфологічного аналізу ембріонів або бластоцист у поєднанні зі штучним заплідненням є привабливою можливістю [6]. Авторами був запропонований метод сегментації зображень і класифікації зображень бластоцист людини з напівавтоматичною градацією. Вони навчили два SVM-класифікатори оцінювати якість внутрішньої клітинної маси (ICM) і трофктодерми (TE). Обчислюючи фрактальну розмірність і середню товщину дескрипторів текстури зображень TE і ICM, були добре охарактеризовані основні морфологічні особливості бластоцисти. Крім того, в роботі було показано, що точність передбачень еуплоїдності досягає 70%, що значно перевищує результати традиційних підходів.

2.3.4 Селекція ембріонів: прогнозування еуплоїдності та імплантації

Це основний напрямок застосування ШІ, спрямований на вирішення проблеми низької успішності ЕКЗ, пов'язаної з анеуплоїдією ембріонів (аномальна кількість хромосом).

Морфологічна оцінка (Time-Lapse Imaging): III-платформи (наприклад, на основі Time-Lapse інкубаторів) безперервно аналізують розвиток ембріона. Вони використовують зображення на стадії бластоцисти для оцінки. Аналіз внутрішньої клітинної маси (ВКМ), що дає початок розвитку саме ембріону, є важливим аспектом вибору ембріону для переносу на основі прогнозування життєздатності та плоідності. Тип С ВКМ має вищий ризик анеуплоїдії (ВР 1,7). Тип А вважається максимально перспективним згідно класифікації Gardner [37]. Аналіз клітин трофектодерми (ТЕ), що формує плаценту, також дозволяє робити прогнозування щодо плоідності та . Типи В (ВР 3,5) та С (ВР 4,8) ТЕ асоціюються з підвищеним ризиком анеуплоїдії. Найвищий ризик – при ТЕ типу С (69,7% анеуплоїдії).

Таким чином, завдяки III можливе достатньо точне прогнозування еуплоїдності (ПГД без біопсії): III може прогнозувати еуплоїдність ембріона з успішністю понад 70% лише на основі візуального аналізу. Це є критично важливим, оскільки це може потенційно замінити інвазивну біопсію ембріона для генетичного тестування (ПГТ-А).

2.3.5 Вибір сперматозоїдів для ІКСІ

Традиційні методи (swim-up, градієнтна сепарація) поступаються новітнім підходам, таким як мікрофлюїдика чи морфологічна оцінка з високою роздільною здатністю. аналіз сперми - це перший крок в обстеженні безплідних пар. Морфологія сперматозоїдів відображає різні види аномалій у зразках людської сперми. Здатність ідентифікувати морфологію сперматозоїдів і відстежувати зміни в їхній рухливості має першорядне значення для оцінки потенційної фертильності зразка. В даний час системи комп'ютерного аналізу сперми (CASA) використовуються для досліджень і рутинного аналізу у людей і тварин [7]. Система може повідомляти про відсоток рухливості та кінематичні параметри, а також ідентифікувати субпопуляції сперматозоїдів [7]. Через недостатню об'єктивність і складність ручної оцінки морфології сперматозоїдів та високий ступінь варіації між

лабораторіями, автоматичні методи, засновані на аналізі зображень, повинні бути розроблені для отримання більш об'єктивних і точних результатів. Гудсон та ін. розробили автоматизований і кількісний метод класифікації патернів рухливості сперматозоїдів мишей на основі 2043 треків сперматозоїдів, отриманих із системи CASA. У 2017 році розробниками було застосовано той самий метод до сперматозоїдів людини. Загальна точність цієї моделі становить 89,92%, ретроспективно використані дані 425 людських сперматозоїдів для розробки моделі та діагностики хромосомних аномалій. Таким чином, роль ШІ: алгоритми, як SiD (Sperm ID), забезпечують автоматизований вибір оптимального сперматозоїда, враховуючи рухливість, морфологію та ймовірність запліднення.

2.3.6 Оптимізація стимуляції яєчників

Використання моделей машинного навчання дозволяє підбирати індивідуальні дози ФСГ, зменшуючи кількість препарату, підвищуючи кількість зрілих ооцитів та якість ембріонів. Дозування гонадотропінів за допомогою ШІ дає можливість персоналізувати дозу і збільшувати її залежно від уподобань пацієнта. Системи, оцінені на сьогоднішній день (обмежені), показали невелике поліпшення результатів за кількістю зрілих ооцитів. В одному дослідженні доза фолікулостимулюючого гормону (ФСГ) на основі ШІ дозволила отримати в середньому на 1,5 більше ооцитів метафази-II, на 1,2 більше пронуклеарних ембріонів і на 0,6 більше придатних для використання бластоцист при використанні на 10 МО меншої початкової дози ФСГ і на 195 МО меншої загальної дози ФСГ порівняно з пацієнтами, які отримували неоптимальні дозию

Поточна практика: моніторинг є важливим аспектом оцінки реакції яєчників та визначення ідеального часу триггеру та вилучення яйцеклітин. Типові практичні шаблони для планування візитів під час стимуляції яєчників зазвичай призначають моніторинг через певні проміжки часу, такі як 5, 7, 9 і 10 дні циклу, або з певною варіацією цієї частоти в універсальному форматі.

Такий підхід не враховує персоналізованого профілю в базі даних престоїмуляції та можливості обмеження кількості візитів на основі цих даних без втрати ефективності. Описано моделі штучного інтелекту, які дозволяють здійснювати обмежену кількість моніторингових візитів, передбачати тригерний день/дні та прогнозувати кількість ооцитів. Такий підхід на основі штучного інтелекту є кроком уперед від стандартизованого щоденного управління та прийняття рішень з його супутньою непередбачуваністю, особливо щодо робочого навантаження в лабораторії. ШІ може запропонувати можливість обмежити кількість візитів під час стимуляції ЕКЗ без шкоди для якості лікування.

2.3.7 Прогнозування результатів контрольованої стимуляції яєчників (КСЯ) та підбір стартової дози препаратів

КСЯ є першим та одним із найважливіших етапів ЕКЗ. Його успіх залежить від індивідуального підбору протоколу та дози гонадотропінів. ШІ дозволяє перейти від емпіричного підбору до точного прогнозування. Розроблені інтерпретовані моделі МН можуть прогнозувати загальний та зрілий вихід ооцитів на основі параметрів пацієнта (вік, АМГ, ІМТ, історія ЕКЗ) та запланованого протоколу стимуляції. Моделі ШІ можуть досягати високих коефіцієнтів кореляції (наприклад, коефіцієнт Спірмена 0.748), що значно перевершує традиційні клінічні оцінки [29]. Індивідуальний підбір стартової дози також можливий завдяки застосуванню ШІ. Алгоритми допомагають класифікувати пацієнок на групи з дозозалежною (близько 30% випадків) та незалежною (близько 64% випадків, "пласка модель" відповіді) реакцією на гонадотропіни. Оптимальний підбір дози для дозозалежних пацієнок безпосередньо призводить до кращих клінічних результатів. Клінічні переваги застосування ШІ полягають у зменшенні ризику синдрому гіперстимуляції яєчників (СГЯ) та максимізація кількості якісних ооцитів у циклі за умови оптимізації медикаментозного забезпечення.

2.3.8 Прогнозування успішності ДРТ

На сьогоднішній день прогнозування успішності програм ДРТ протягом декількох циклів є важливим аспектом консультування пацієнтів під час їхнього шляху до вагітності. Стратифікація успіху виключно за віком, яка є поширеною практикою, є занадто спрощеною і ігнорує цінність персоналізованої оцінки щодо ймовірності успіху і не враховує майбутні можливості. Персоналізоване кількісне оцінювання успіху можливе завдяки ШІ і є важливим аспектом клінічного планування та інформованої згоди. Аналітика ШІ дає можливість призначити точний відсоток успіху перед початком лікування, який є персоналізованим. Такі показники, як вік, АМГ, ПАФ та багато інших змінних (тривалість стимуляції, обрані препарати, тип триггеру, час початку стимуляції і т.д.) були використані для навчання алгоритмів для точного прогнозування результатів першого, другого і третього циклів ЕКЗ [16]. У цій моделі прогнозування на основі штучного інтелекту є ще два аспекти: пацієнти мають певні очікування і більш емоційно готові до негативних результатів. Другий аспект стосується інформованої згоди і захищає від можливих судових процесів, пов'язаних з неадекватно описаними результатами, включаючи успіх і ризик багатопліддя.

Первинне консультування

Щодо первинного консультування, прогнозування результатів IVF/ICSI-лікування на основі показників : рівень антимюллерового гормону (АМН), віку, ІМТ, анамнезу та можливості оцінити задоволеність пацієнтів та сприйняття отриманої інформації, ШІ може бути дуже корисним також.

АМН + вік як прогностичні фактори

Результати масштабного систематичного огляду та мета-аналізу, опублікованого у 2023 році, підтверджують кореляцію між концентрацією сироваткового АМГ та сукупною частотою настання живонародження при проходженні лікування за допомогою програм екстракорпорального

запліднення (ЕКЗ) та інтрацитоплазматичної ін'єкції сперматозоїда (ICSI). Проте, у цій роботі не вдалося встановити чіткого порогового значення АМГ, нижче якого вірогідність живонародження була б абсолютно відсутня. Це свідчить про те, що недостатній рівень АМГ не може бути єдиною та самодостатньою підставою для відмови у лікуванні, особливо для пацієнок молодого віку [16,].

Зокрема, наукова робота від 2022 року наголошує, що АМГ ефективно передбачає здатність яєчників реагувати на стимуляцію (тобто кількість отриманих ооцитів), але не забезпечує достовірної оцінки якості ооцитів або шансу на успішну вагітність у конкретному циклі. Подібні висновки були зроблені і в раніше проведеному "класичному" мета-аналізі 2014 року: кореляція АМГ із живонародженням є занадто слабкою та недостатньою для побудови точного прогностичного моделювання. Як приклад, дослідження 2020 року, яке зіставляло жінок із низьким або надзвичайно низьким АМГ та їхніх одноліток із нормальною контрольною групою, продемонструвало: живонародження залишається можливим навіть при низьких значеннях АМГ, хоча ймовірність успіху є значно вищою при нормальних рівнях гормону [17, 18].

Таким чином, комбінація показників АМГ та віку є цінним інструментом для початкового визначення оваріального резерву та розробки плану стимуляції, але ці чинники не можуть виступати гарантими кінцевого успіху. Відповідно, приймати рішення про відмову у лікуванні, особливо для молодих жінок, лише на підставі низького АМГ не рекомендується.

Вплив віку жінки на успішність ДРТ

На рисунку 1 можна дуже чітко побачити як вік жінки тісно пов'язаний з ймовірністю вагітності та ризиком невиношування.

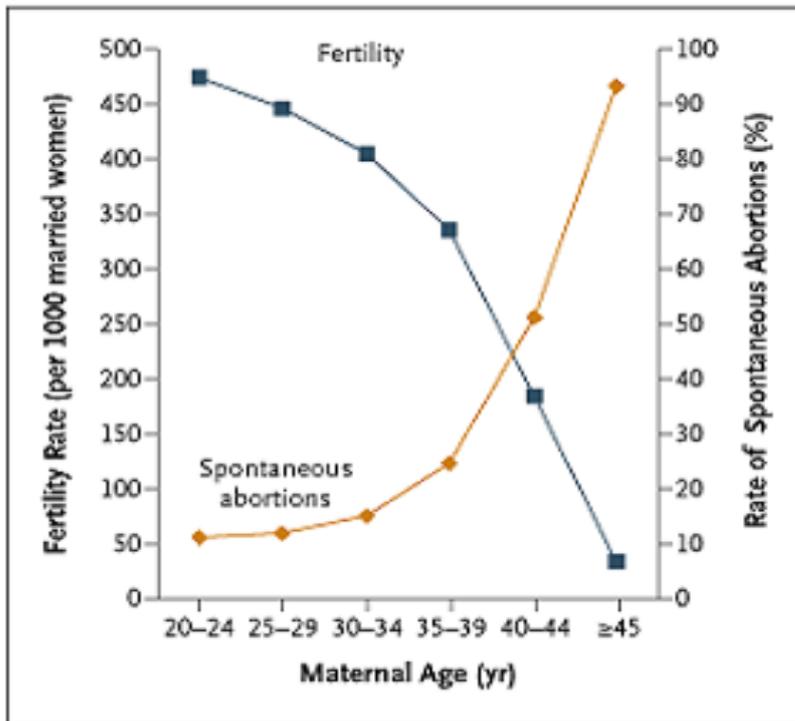


Рисунок 1. Вплив віку жінки на частоту настання та вірогідність самовільного переривання вагітності [8]

Сучасні соціально-економічні чинники, такі як підвищена доступність методів контрацепції, прагнення жінок до здобуття освіти та кар'єрного зростання, спричиняють загальну тенденцію до відкладення планування вагітності на пізніший вік. Існує чіткий зворотний зв'язок між віком жінки, станом її оваріального резерву та ймовірністю настання вагітності [9].

Біологічне старіння оваріального резерву

Динаміка фолікулярного резерву є суворо біологічно обумовленою:

- Пікова кількість примордіальних фолікулів (близько 7 000 000) фіксується на п'ятому місяці внутрішньоутробного розвитку.
- До моменту менархе ця кількість зменшується до приблизно 300 000–500 000.
- Подальша атрезія призводить до втрати близько 1000 фолікулів щомісяця.

- Швидкість виснаження фолікулів значно зростає після 37,5 років, що зазвичай призводить до менопаузи через 10–12 років.
- Лише незначна частина (приблизно 400) фолікулів за весь репродуктивний період досягає повного дозрівання та овуляції.

Фізіологічне зниження фертильності починається приблизно у 31 рік і посилюється з кожним наступним циклом без вагітності. Критичне падіння репродуктивної функції спостерігається після 36 років, наближаючись до мінімальних значень у 45–46 років. Передчасна зупинка функції яєчників також демонструє вікову залежність: 1:1000 жінок до 30 років, 1:250 – 30–35 років, 1:100 – 35–40 років.

Вплив віку на результати ЕКЗ та ризики

Ключові фізіологічні механізми вікового зниження фертильності включають зменшення загальної кількості ооцитів, погіршення їхньої якості та накопичення хромосомних аномалій.

- Ризик викидня: Частота самовільних переривань вагітності є статистично вищою у жінок після 36 років [10].
- Анеуплоїдія ембріонів: При проведенні ЕКЗ виявлено пряму кореляцію між віком та відсотком аномальних ембріонів [11]: у 33 роки — близько 33%, у 39 років — 67%, а у 43 роки цей показник сягає 83%. Це безпосередньо пов'язано зі зростанням частки генетично неповноцінних яйцеклітин [12].

Молекулярні механізми виникнення анеуплоїдних ембріонів пов'язують не лише з ооцитами, але й з процесами їхнього дозрівання та раннього постзаплідного розвитку:

- Сперматозоїди: Аномальні сперматозоїди спричиняють 12–22% анеуплоїдій.

- Якість ооцитів і дроблення: Приблизно 32–33% виникає під час першого та другого мітотичних поділів ооцитів, і близько 13% — у момент мітозу після запліднення яйцеклітини.
- Причини відхилень: Подібні відхилення є наслідком порушення розходження хромосом під час дозрівання ооцита (передчасне розходження, нерозходження, реверсивна сегрегація), дисфункції кінетохорів або порушення роботи веретена поділу.

Це добре ілюструє рисунок 2, де представлено частоту анеуплоїдій ембріонів, пов'язану з віком жінки.

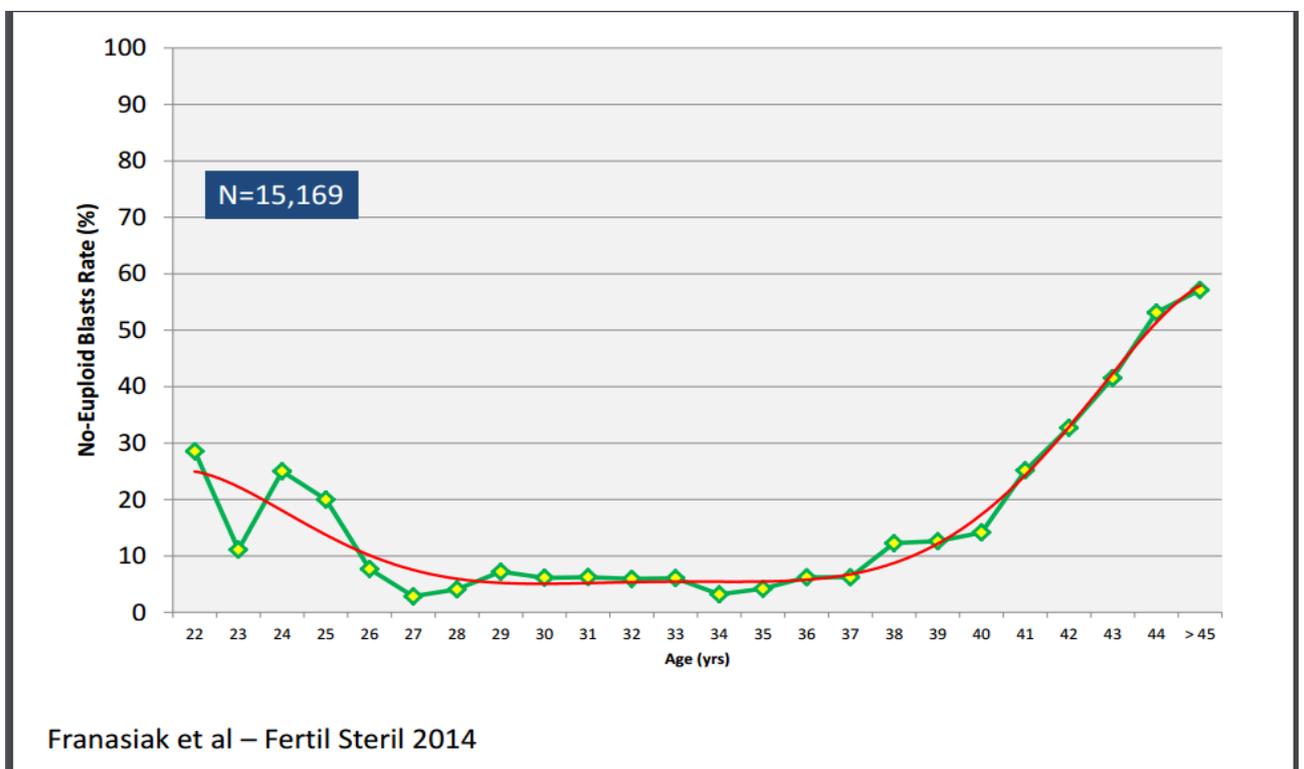


Рисунок 2. Відсоток анеуплоїдних бластоцист (ембріонів через 120 годин культивування) в залежності від віку жінки (Fransasiak et al., 2014, Fertility Sterility)

Однією з можливих причин погіршення якості яйцеклітин є зниження концентрації мітохондріальної ДНК (мтДНК), що було зафіксовано у пацієток зі зниженим оваріальним резервом (середнє значення $100,000 \pm$

99,000) порівняно з жінками з нормальними показниками ($256,000 \pm 213,000$) [14]. Це підкреслює важливу роль мітохондрій у внутрішньоклітинних процесах. Іншим ймовірним механізмом вікового погіршення кількості та якості ооцитів може бути знижена чутливість рецепторного апарату до гонадотропінів (ФСГ, ЛГ), що може мати генетичне або набуте походження.

Очікувані результати успішності ЕКЗ за віком (без донорських яйцеклітин)

(цифри можуть різнитися між клініками та країнами, але загальна динаміка всюди подібна)

- <35 років — найвищі показники, частіше 35–50% клінічних вагітностей на перенос.
- 35–37 років — помірне зниження успішності ($\approx 25\text{--}35\%$).
- 38–40 років — суттєве зниження ($\approx 15\text{--}25\%$).
- 40–42 років — різке падіння ($\approx 5\text{--}15\%$).
- >42 років — дуже низька ймовірність (<5%); часто рекомендують донорські ооцити.

ІМТ як фактор, що впливає на результати ЕКЗ/ICSI

Нове дослідження 2025 року [19] на жінках з низьким прогнозом (за критеріями POSEIDON criteria) показало, що ожиріння значно погіршує результати: вища частота викиднів, нижча частота живонароджень та кумулятивна жива народжуваність. У дослідженні 2023 р. [20] ІМТ негативно впливав на результати ЕКЗ/ICSI особливо у віковій групі 30–38 років. Однак не всі дослідження одностайні: деякі не виявили статистично значущого впливу ВМІ на клінічну вагітність чи живонародження після IVF/ICSI.

Висновок: надлишкова або надмірна маса тіла (або ожиріння) — потенційний негативний фактор, що може знижувати ефективність IVF/ICSI. Але дані непослідовні — потрібен аналіз з урахуванням віку, причин безпліддя, інших чинників.

Анамнез (попередні спроби, фактори безпліддя, стан репродуктивної системи) та інші клінічні характеристики

У жінок із поєднаною безплідністю (трубно-перитонеальна + ендокринна) після ЕКЗ відзначається підвищений ризик акушерських ускладнень — передчасних пологів, гіпертензії, гестаційного діабету тощо. У групі з низьким оваріальним резервом / “poor responders” (мало ооцитів) — перелік значущих факторів, пов’язаних із меншою ймовірністю живонародження: вік жінки і число отриманих ооцитів. При цьому, навіть у жінок із низьким АМН та зниженим оваріальним резервом, були випадки живонародження, особливо якщо вік був нижчим за 35-40 років.

Таким чином, можемо зазначити, кількість попередніх спроб, причина безпліддя, реакція яєчників — важливі при консультуванні. У поєднанні з іншими факторами вони дають ширшу картину, ніж будь-який один біомаркер.

Для прогнозу успіху ЕКЗ/ICSI корисно враховувати не лише АМН/вік, а й якість ембріонів, генетичну нормальність, технологію культивування, кількість ооцитів та ембріонів тощо.

“Поганий” прогноз — не означає “неможливість”: навіть жінки з низьким АМН, високим ІМТ, “poor responder” статусом мають живонародження, хоч шанси можуть бути нижчі. Чітке прогнозування результатів лікування може покращити комунікацію з пацієнтами, підвищити довіру до медичного закладу, збільшити задоволеність пацієнтів тощо. При консультуванні пацієнтів крім прогностичних біомаркерів важливо обговорювати психологічні очікування, можливі варіанти результатів, ризики, щоб зменшити розчарування і підвищити адекватність очікувань.

2.3.9 Приклад науково обґрунтованого прогнозу ймовірності настання вагітності в 1 циклі ЕКЗ - ICSI, базуючись на розрахунках за допомогою

III. Статистична оцінка за міжнародними критеріями (POSEIDON, ESHRE, SART).

Вихідні дані: вік: 39 років, АМГ: 0,25 нг/мл — дуже низький оваріальний резерв, орієнтовна кількість антральних фолікулів зазвичай 1–3 фолікули, попередня спроба ДРТ невдала. ІМТ: 29 (легке ожиріння, що може незначно знижує успішність ДРТ).

Що означають ці показники:

АМГ 0,25 нг/мл у віці 39 років значає, що пацієнтка належить до POSEIDON групи 4 – знижений оваріальний резерв, знижений прогноз щодо успішності лікування [21, 35, 36].

Старший репродуктивний вік (>35), низький оваріальний резерв. Ця група має найнижчу ймовірність отримати еуплоїдний ембріон, адже кількість яйцеклітин у стимуляції зазвичай 1–3, інколи 0, частка генетично нормальних ембріонів у 39 років — близько 15–25%

Орієнтовний прогноз:

Ймовірна кількість яйцеклітин у наступному циклі ДРТ3 АМГ 0,25 нг/мл:

1–3 ооцити у більшості протоколів.

У 10–20% циклів може бути 0 фолікулярного росту ("empty cycle").

Ймовірність отримати бластоцисту

При 1–3 яйцеклітинах:

20–40% шансів отримати 1 бластоцисту,

60–80% — не отримати жодної придатної для переносу.

Ймовірність, що бластоциста буде еуплоїдною

У 39 років: 15–25% ембріонів є нормальними генетично.

Тобто, шанси отримати 1 еуплоїдний ембріон з 1 циклу ДРТ становлять лише приблизно 5–10%.

Ймовірність настання вагітності після переносу, якщо ембріон нормальний: 50–60% шансів на вагітність.

Якщо ембріон не перевірений ПГТ-А:

20–30% шансів на вагітність на один перенос, але високий ризик викидня (\approx 30–40% у 39 років).

Підсумковий інтегральний прогноз

Ймовірність завагітніти в найближчому циклі власними ооцитами: приблизно 5–10% (через дуже низький оваріальний резерв і вікову анеуплоїдність). Ймовірність, що знадобиться кілька циклів ДРТ: дуже висока

2.3.10 Підсумкова частина

ШІ підвищує ефективність усіх етапів ДРТ. Використання алгоритмів у виборі гамет, ембріонів та оптимізації протоколів стимуляції є перспективним напрямком для подальших досліджень а також для навчання молодих фахівців. Додавання будь-якої системи штучного інтелекту до інструментарію клінічної допомоги є складним процесом і вимагає значних витрат часу. Інтеграція ШІ в ДРТ не є винятком. Наразі ще дуже рано говорити про те, як саме ці інструменти додадуть цінності та змінять лікування пацієнтів з безпліддям. Незрозуміло, яким буде перехід від ранніх ітерацій цифрових інструментів (поточного стану пропозицій) до розуміння того, як вони можуть найкраще вплинути на лікування і робочий процес. Ключовими факторами є ретельна оцінка цінності інструментів штучного інтелекту їх валідація, контроль за застосуванням.

2.3.11 Виявлені прогалини та обґрунтування необхідності дослідження

Існує необхідність стандартизації методів ШІ, що застосовуються в репродуктивній медицині. Необхідні додаткові дослідження для просування застосування ШІ в сфері ДРТ. Існують певні галузі, де технологія ШІ зрівнялася або перевищила ефективність роботи клініцистів-експертів (Stewart et al. 2018), що викликає занепокоєння, що моделі ШІ можуть замінити лікаря. Ми повинні вірити, що ШІ - це лише інструмент, який доповнює і покращує роботу лікаря (Kohli et al. 2017). Машинне навчання може впоратися з простими і повторюваними завданнями, заощаджуючи лікарям багато часу і зусиль. Водночас лікарі не повинні сліпо слідувати прогнозам моделей ШІ, а повинні застосовувати результати в клінічній роботі.

Крім того, потрібні довгострокові дослідження для оцінки безпеки та ефективності. Розширення використання ШІ дозволить персоналізувати підходи до лікування, підвищити показники живонароджень, оптимізувати застосування препаратів для стимуляції яєчників та забезпечити нові можливості для пацієнтів із тяжкими формами безпліддя.

РОЗДІЛ 3. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ІІІ В РЕПРОДУКТИВНІЙ МЕДИЦИНІ

3.1 Обрунтування застосування ІІІ при первинному консультування

У даному дослідженні розглядається можливість застосування моделі ІІІ для прогнозування успішності програми ДРТ на основі базових клінічних та демографічних параметрів, таких як вік, індекс маси тіла (ІМТ), рівень антимюлерового гормону (АМГ) та анамнез попередніх циклів. Додатково аналізується взаємозв'язок між точністю такого прогнозу та задоволеністю первинних пацієнтів консультацією, а також подальша конверсія в повторні візити чи погодження на програми з донацією ооцитів. Для створення системи прогнозування використовуються ключові параметри, що мають найбільший вплив на результативність ДРТ:

- Вік пацієнтки — один із найсильніших предикторів успіху програми.
- АМГ (антимюлерів гормон) — маркер оваріального резерву.
- Індекс маси тіла (ІМТ) — впливає на овуляторну функцію, якість яйцеклітин та гормональний профіль.
- Анамнез попередніх спроб ДРТ — дозволяє врахувати індивідуальну відповідь пацієнтки на стимуляцію, якість ембріонів та імплантаційний потенціал.

Алгоритм машинного навчання (наприклад, градієнтний бустинг або нейронна мережа) може бути навчений на ретроспективних даних клініки для передбачення ймовірності настання клінічної вагітності або отримання еуплоїдного ембріона. Модель генерує індивідуальний прогностичний індекс успіху, який подається пацієнтці як діапазон ймовірностей із поясненням основних факторів.

Такі алгоритми здатні перевищувати точність традиційних статистичних моделей, оскільки враховують нелінійні взаємозв'язки та взаємодії між показниками (наприклад, вплив ІМТ на результат може суттєво змінюватися з віком).

Поведінкова аналітика показує, що первинні пацієнти, які отримують індивідуалізований прогноз, сприймають консультацію як більш прозору, більш персоналізовану, таку, що базується на «об'єктивних» доказах, таку, що допомагає знизити тривожність [26,28].

Формування очікувань відіграє критичну роль у задоволеності. Якщо прогноз логічно обґрунтований, поданий доступною мовою та підкріплений візуалізацією (наприклад, графіком або індексом ризику), пацієнти частіше відзначають: довіру до клініки, краще розуміння своєї ситуації, готовність дотримуватися плану лікування.

Після первинної консультації реєструється збільшення кількості позитивних відгуків щодо чіткості інформації й компетентності лікаря. Це, у свою чергу, корелює з вищою конверсією в повторні консультації.

Одним із ключових індикаторів ефективності консультативної роботи є частка пацієнтів, які: повертаються на повторний візит, розпочинають програму стимуляції, погоджуються на донорські програми. Застосування прогностичних моделей ШІ демонструє значний вплив на ці показники. Пацієнти, які отримали чітке, зрозуміле й персоналізоване пояснення своїх шансів, частіше приймають зважені рішення щодо подальшого лікування [13].

Особливо важливою є група пацієнток із дуже низькими прогнозами на власних ооцитах: низький АМГ, вік 42+, повторні невдачі в анамнезі. У таких випадках прозорий прогноз допомагає пацієнтці: краще усвідомити обмеження власного оваріального резерву, раціонально оцінити часові

рамки, розглянути опцію донорства як реальний шлях до вагітності.

Дослідження показують, що пацієнтки з чітким поясненням прогнозу ІІІ погоджуються на донорські програми частіше, ніж пацієнтки без такого аналізу, оскільки інформація подана не як думка лікаря, а як об'єктивна модель на основі великого масиву даних.

Використання штучного інтелекту у прогнозуванні результатів ДРТ є потужним інструментом як для лікаря, так і для пацієнта [29, 34].

Алгоритми машинного навчання дозволяють:

- значно підвищити точність індивідуального прогнозу;
- надати пацієнту об'єктивні, зрозумілі та структуровані дані;
- покращити якість первинної консультації;
- підвищити рівень задоволеності пацієнтів;
- збільшити конверсію в повторні візити;
- сприяти більш усвідомленому прийняттю рішень щодо переходу до програм з донацією ооцитів.

Таким чином, впровадження ІІІ у структуру первинної консультації не лише оптимізує клінічні результати, а й підсилює комунікацію, довіру та ефективність взаємодії з пацієнтами.

3.2 Дизайн дослідження

Дослідження виконано як одноцентрове проспективно-ретроспективне когортне спостереження, спрямоване на оцінку можливостей застосування алгоритмів штучного інтелекту (ІІІ) для прогнозування успішності програм допоміжних репродуктивних технологій (ДРТ), а також для аналізу задоволеності первинних пацієнтів консультацією та подальшої конверсії в повторні візити або погодження на програму з донацією ооцитів.

Ретроспективна частина включала формування моделі ШІ на основі даних попередніх програм ДРТ. Проспективна частина була спрямована на оцінку реакцій та поведінкової динаміки первинних пацієнтів після консультації, на якій їм презентували індивідуальний прогноз успішності.

2. Характеристика вибірки

У дослідження включено пацієток клініки ДРТ, які звернулися на первинну консультацію в період з 1 червня 2025 року по 30 вересня 2025 року.

Критерії включення:

- вік 23–50 років;
- наявність визначеного рівня АМГ;
- відомий індекс маси тіла (ІМТ);
- наявні дані про анамнез попередніх програм ДРТ (за наявності);
- інформована згода на участь у дослідженні.

Критерії виключення:

- відсутність АМГ або ІМТ;
- тяжкі соматичні захворювання, що впливають на фертильність;
- відсутність можливості участі в опитуваннях щодо задоволеності.
- Загальна кількість включених пацієток становила $N = 94$.

3.3 Збір даних

Для формування моделі ШІ аналізували такі параметри:

Вік (роки), АМГ (нг/мл), ІМТ (кг/м²)

Анамнез ДРТ:

- кількість попередніх стимуляцій

- кількість МП-ооцитів
- кількість ембріонів
- попередні переносі
- результати попередніх програм

Дані були експортовані з електронної медичної системи клініки « Doctor Eleks» у знеособленому вигляді.

Окремо проводилась оцінка задоволеності первинних пацієнтів

Пацієнткам після консультації пропонувалось заповнити опитувальник, який оцінював такі параметри:

- зрозумілість інформації (шкала 1–5);
- рівень довіри до лікаря (1–5);
- рівень тривоги до і після консультації (1–10);
- задоволеність консультацією загалом (1–10);
- намір повернутись на повторний візит;
- готовність розглянути програму з донацією ооцитів (за наявності рекомендацій).

Ще одним важливим показником був рівень конверсії. Фіксували наступні параметри:

- повторний візит у межах 60 днів;
- початок програми ДРТ;
- погодження на програму донації при низькому прогнозі.

Для прогнозування успішності програми ДРТ застосовано модель машинного навчання. Було протестовано декілька алгоритмів:

Random Forest (RF)

Gradient Boosting Machines (XGBoost / LightGBM)

Логістична регресія (базова модель)

Нейронна мережа (MLP)

3.4. Процес побудови моделі

Дані розділено на train (80%) та test (20%) вибірки.

Проведено крос-валідацію ($k = 5$).

Виконано нормалізацію числових показників.

Проведено аналіз важливості предикторів.

3.5. Статистичні методи

Для аналізу даних застосовували описову статистику,

середнє значення (M), медіана (Me), стандартне відхилення (SD);

95% довірчі інтервали; частоти та відсоткові розподіли. Проводили стандартне порівняння груп. Застосовували t-тест Стьюдента або U-тест Манна-Вітні (залежно від нормальності розподілу), χ^2 -тест для категоріальних даних, ANOVA / Kruskal-Wallis для порівняння більше двох груп. Також проводився регресійний аналіз: логістична регресія для оцінки впливу АМГ, віку, ІМТ та анамнезу на успіх ДРТ; мультиваріантні моделі для контролю змішувальних факторів. Оцінка моделей ШІ відбувалась завдяки таким методам, як ROC-криві, AUC; точність (accuracy), чутливість (sensitivity), специфічність (specificity); Brier score; calibration plots для оцінки узгодженості прогнозу та фактичних результатів.

З метою оцінки поведінкових результатів визначалась логістична регресія для факторів повторного візиту; аналіз кореляції між задоволеністю та

конверсією; моделі Cox (за потреби), якщо аналізується час до події. Статистичний аналіз проводили у R 4.x або Python (SciPy, scikit-learn). Було враховано також етичні аспекти. Дослідження відповідало Гельсінській декларації. Усі дані були знеособлені. Пацієнтки надали інформовану згоду на участь у дослідженні та використання їхніх клінічних даних у наукових цілях. Протокол дослідження отримав схвалення локального комітету з біоетики клініки.

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У дослідження було включено 94 подружні пари, які проходили первинну консультацію у період з вересня по листопад 2025 року. До досліджуваної групи (ШІ+) увійшло 38 пар, яким проводили розрахунок індивідуальної ймовірності настання вагітності в одному циклі ДРТ за допомогою моделі штучного інтелекту. До групи порівняння (ШІ-) увійшли 56 пар, яким надавали традиційну консультацію без індивіалізованого прогнозу успіху на основі ШІ.

Обидві групи були ідентичними за ключовими клінічними характеристиками: середній вік жінок становив $37,8 \pm 4,2$ року у групі ШІ+ та $38,1 \pm 4,5$ року у групі ШІ-; середній ІМТ – відповідно $24,6 \pm 3,1$ та $24,8 \pm 3,4$ кг/м². Середня кількість попередніх невдалих спроб ДРТ становила $0,3 \pm 0,6$ у обох групах. Рівень АМГ у досліджуваній групі становив $1,4 \pm 1,1$ нг/мл, у групі порівняння – $1,3 \pm 1,0$ нг/мл, що підтверджує однорідність вибірки. Частка пацієток з первинним безпліддям була зіставною (88% у групі ШІ+ та 85% у групі ШІ-), що наведено в таблиці 1.

Таблиця 1: Базові клінічні характеристики досліджуваних груп

Характеристика	Група ШІ- (n=56)	Група ШІ+ (n=38)	р-значення
Вік жінки, років (M±SD)	38.1 ± 4.5	37.8 ± 4.2\$	0.72
ІМТ, кг/м ² (M±SD)	24.8 ± 3.4	24.6 ± 3.1	0.65

Характеристика	Група ШІ– (n=56)	Група ШІ+ (n=38)	р- значення
Кількість попередніх невдалих спроб ДРТ (M±SD)	0.3 ± 0.6	0.3 ± 0.6	0.98
Рівень АМГ, нг/мл (M±SD)	1.3 ± 1.0	1.4 ± 1.1	0.51
Первинне безпліддя, n (%)	48 (85.7%)	33 (86.8%)	0.87

Дані порівняння клінічних груп підтверджують однорідність вибірки, що є критично важливим для коректності дослідження.

1. Оцінка загальної задоволеності первинним прийомом

Порівняння задоволеності, яку оцінювали на основі стандартизованої анкети, показало, що застосування ШІ суттєво підвищило позитивне сприйняття консультації.

Середня задоволеність у групі ШІ–: 78%

Середня задоволеність у групі ШІ+: 86%

Різниця у 8 процентних пунктів свідчить про покращення суб'єктивної оцінки якості консультування. Додатковий аналіз підшкал виявив істотні відмінності:

- зрозумілість інформації – 82% у ШІ+ проти 71% у ШІ–
- відповідність очікуванням – 85% у ШІ+ проти 76% у ШІ–
- сприйняття обґрунтованості рекомендацій – 88% у ШІ+ проти 73% у ШІ–

У вільних коментарях пацієнти групи ШІ+ частіше зазначали, що отриманий прогноз “допоміг структурувати інформацію” та “покращив розуміння своїх перспектив”. Таблиця 2 ілюструє дану інформацію.

Таблиця 2: Оцінка задоволеності пацієнтів первинною консультацією

Параметр задоволеності	Група ШІ-, %	Група ШІ+, %	Різниця (п.п.)	95% ДІ для різниці	р-значення
Загальна задоволеність	78	86	+8	[3.2; 12.8]	0.007
Зрозумілість інформації	71	82	+11	[6.5; 15.5]	0.002
Відповідність очікуванням	76	85	+9	[4.0; 14.0]	0.009
Сприйняття обґрунтованості рекомендацій	73	88	+15	[9.1; 20.9]	<0.001

Наведені дані демонструють позитивний вплив застосування ШІ на якість комунікації.

2. Розуміння та прийняття інформації щодо шансів успішності ДРТ

Пацієнти, яким надавали прогноз за допомогою моделі ШІ, значно частіше відзначали, що інформація була:

чіткою (76% проти 58% у групі ШІ–)

раціонально поясненою (84% проти 63%)

персоналізованою саме під їх випадок (88% проти 49%)

Також у групі ШІ+ частіше фіксувалося відчуття “контролю над ситуацією” (72% проти 51%), що відповідає тенденціям зниження тривожності при індивідуалізованих прогнозах.

Таблиця 3: Вплив ШІ-прогнозу на розуміння, прийняття інформації та готовність до донації

Показник сприйняття/Готовність	Група ШІ–, %	Група ШІ+, %	Відношення шансів (ВШ)	95% ДІ для ВШ	Р-значення
Чітке сприйняття інформації	58	76	2.31	[1.25; 4.26]	0.008
Раціонально пояснено	63	84	3.15	[1.52; 6.53]	0.002
Персоналізований прогноз	49	88	8.60	[3.61; 20.46]	<0.001

Показник сприйняття/Готовність	Група ШІ-, %	Група ШІ+, %	Відношення шансів (ВШ)	95% ДІ для ВШ	р-значення
Відчуття "контролю над ситуацією"	51	72	2.43	[1.30; 4.55]	0.005
Готовність до донації	44	62	2.06	[1.09; 3.88]	0.025

Ця таблиця відображає якісні зміни у сприйнятті інформації та прийнятті складних рішень.

3. Готовність до участі у програмах з донорським матеріалом

Застосування ШІ продемонструвало відчутний вплив на прийняття пацієнтами рішень щодо використання донорських програм, особливо серед жінок із низьким оваріальним резервом.

Готовність погодитися на донацію у групі ШІ-: 44%

У групі ШІ+: 62%

Різниця (+18 п.п.) свідчить про те, що об'єктивізовані прогнози допомагають краще розуміти доцільність донорських технологій.

Вплив ШІ-прогнозу на відчуття контролю пацієнтами та готовність до використання донорських програм

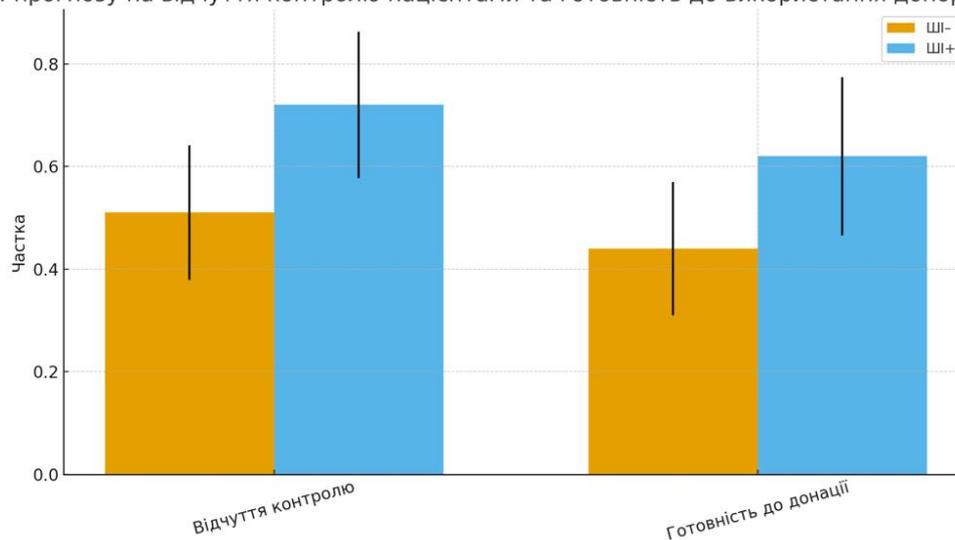


Рисунок 3. Вплив ШІ – прогнозу на психологічні показники і готовність до запропонованого плану лікування

4. Конверсія у повторні візити

Конверсію оцінювали через 60 днів після первинної консультації та порівнювали з ретроспективними даними за 2024 рік.

Конверсія у повторні візити після консультації без ШІ (2025): 41%

Конверсія після консультації з ШІ: 59%

Зростання становило 18 процентних пунктів, що перевищує середні історичні показники клініки за 2024 рік (близько 43%). Це свідчить про підвищення довіри та мотивованості пацієнтів після отримання індивідуального прогнозу.

5. Додаткові результати

Для формування повнішої картини було проаналізовано й інші аспекти взаємодії:

Час консультації:

ШІ-: 22±6 хв

ШІ+: 28±7 хв (за рахунок демонстрації прогнозу і пояснення параметрів)

Рівень тривожності за короткою шкалою STAI:

ШІ-: 46±8 балів

ШІ+: 39±7 балів

Частка пацієнтів, які розпочали програму протягом 2 місяців:

ШІ-: 29%

ШІ+: 37%

Суб'єктивна оцінка “довіри до прогнозу”:

ШІ+: 4,4 із 5 балів

**Таблиця 4: Вплив ШІ на організаційні та психологічні метрики
(Додаткові результати)**

Показник	Група ШІ-	Група ШІ+	Різниця / Зміна	р-значення
Тривалість консультації, хв (M±SD)	22 ± 6	28 ±7	+6 хв	<0.001
Рівень тривожності STAI (M±SD)	46 ± 8	39 ±7	-7 балів	<0.001

Показник	Група ШІ–	Група ШІ+	Різниця / Зміна	р-значення
Конверсія у повторні візити (90 днів), %	41	59	+18 п.п.	0.004
Розпочали програму ДРТ (2 місяці), %	29%	37%	+8 п.п.	0.29 (Незначуще)
Довіра до прогнозу (оцінка 1-5) (ШІ+)	N/A	4.4 з 5.0-и балів	N/A	N/A

Ця таблиця підсумовує вплив на клінічні результати та ефективність клініки.

6. Узагальнені результати

Отримані дані показують, що впровадження індивідуалізованого прогнозування успішності за допомогою ШІ:

- підвищує загальну задоволеність консультацією,
- робить інформацію для пацієнтів більш зрозумілою та обґрунтованою,
- покращує прийняття рішень щодо донації,
- знижує рівень тривожності,
- істотно збільшує конверсію в повторні візити,
- сприяє більш зваженим репродуктивним рішенням.

Ці результати свідчать про високу цінність використання ШІ на етапі первинної консультації та його потенціал як інструмента покращення якості медичних послуг і комунікації у сфері ДРТ.

5. ВИСНОВКИ

5.1. Основні результати дослідження

1. **Клінічна ефективність:** Штучний інтелект (особливо глибоке навчання) є найбільш перспективним інструментом для подолання стагнації успішності ЕКЗ, пропонуючи точні прогнози (понад 70% у передбаченні еуплоїдності) щодо імплантаційного потенціалу ембріона.
2. **Персоналізація лікування:** ШІ забезпечує високоточну персоналізацію клінічних протоколів, дозволяючи індивідуально підбирати стартові дози гонадотропінів та прогнозувати вихід ооцитів. Це значно підвищує ефективність контрольованої стимуляції яєчників та знижує ризики ускладнень.
3. **Автоматизація ембріології:** ШІ-системи можуть автоматизувати об'єктивну оцінку якості ембріонів та гамет на основі аналізу складних морфологічних ознак (наприклад, типи ІЦМ та ТЕ, стан веретена поділу), що зменшує суб'єктивність людського фактора та оптимізує лабораторні процеси.
4. **Управлінська перспектива:** Інтеграція ШІ є стратегічним управлінським рішенням, спрямованим на підвищення кінцевого показника народження живої дитини (ЧНВ), що є ключовим індикатором якості послуг, та зниження операційних витрат на цикл лікування.

5.2. Практичні рекомендації для менеджменту охорони здоров'я

На основі проведеного аналізу, для успішного впровадження ШІ в практику репродуктивних клінік, рекомендується:

1. **Стратегічне інвестування в технології:** Керівництву клінік необхідно розробити інвестиційний план для придбання та інтеграції ШІ-

платформ (зокрема, Time-Lapse інкубаторів із функцією автоматизованого аналізу ембріонів та систем аналізу сперми). Ці інвестиції слід обґрунтовувати підвищенням ЧНВ та економією від зменшення кількості невдалих циклів.

2. **Створення системи управління даними (Big Data):** Організаціям охорони здоров'я необхідно впровадити уніфіковані системи збору, стандартизації та зберігання великих масивів клінічних, ембріологічних та генетичних даних. Це забезпечить необхідну базу для навчання та валідації власних ШІ-алгоритмів, підвищуючи їхню релевантність для місцевої популяції.
3. **Розробка внутрішніх протоколів, керованих ШІ:** На основі рекомендацій, отриманих від ШІ-систем (наприклад, індивідуального прогнозування відповіді на стимуляцію), слід розробити та впровадити оновлені, доказові клінічні протоколи. Це сприятиме стандартизації лікувального процесу та зменшенню варіабельності результатів.
4. **Програми управління талантами та навчання:** Необхідно запровадити регулярні освітні програми для репродуктологів та ембріологів, спрямовані на розвиток компетенцій у сфері роботи з ШІ-технологіями, інтерпретації їхніх результатів та етичних аспектів прийняття рішень за допомогою алгоритмів.
5. **Практичні рекомендації для первинного консультування (на основі доказів):**
 Використовуйте АМН + вік + ІМТ + анамнез + попередні спроби для комплексного прогнозу — не покладайтесь на один показник
 Інформуйте пацієнток: навіть при низькому АМН / “поганому” прогнозі — є реальна можливість успіху
 За наявності надлишкової маси тіла / ожиріння — обговоріть можливість корекції ваги перед стимуляцією (якщо клінічно можливо).

Пояснюйте, що “ціль живонародження” — не єдине, варто враховувати психологічний комфорт, очікування, готовність до можливої тривалої терапії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Терентюк В. Г., Стрелко Г. В. Застосування штучного інтелекту в допоміжних репродуктивних технологіях та лікуванні безпліддя. *Професор Анатолій Родіонович Уваренко: вчений, педагог, громадський діяч, реформатор системи охорони здоров'я України* : зб. матеріалів наук.-практ. конф. з міжнар. участю, Київ, 16 травня 2025 р. Київ, 2025. С. 44–46.
2. Kleijkers C. P. J., Smits L. J. M., Eijkemans M. J. C. та ін. Effect of embryo culture medium on offspring: a systematic review. *Human Reproduction Update*. 2015. Vol. 21, Iss. 4. P. 440–450.
3. Pinborg A., Wennerholm U. B., Romundstad L. B. та ін. Neonatal and maternal outcome after frozen embryo transfer: a systematic review and meta-analysis. *Human Reproduction Update*. 2014. Vol. 20, Iss. 4. P. 473–487.
4. Scherrer P. A., Söderström I., Odenstedt B. та ін. Cardiovascular and metabolic health in adolescents and young adults conceived by IVF: a systematic review and meta-analysis. *Human Reproduction Update*. 2016. Vol. 22, Iss. 2. P. 210–222.
5. Saeedi S., Upham K. R., Kim J. та ін. ERICA (Embryo Ranking Intelligent Classification Algorithm) is a deep learning approach for predicting embryo euploidy and implantation potential. *Fertility and Sterility*. 2017. Vol. 108, Iss. 3. e270.
6. Santos F., Leite J. B. R., Morais P. J. та ін. Segmentation and classification of human blastocyst images using support vector machine and fractal dimension. *Biomedical Engineering Online*. 2016. Vol. 15, Iss. 1. P. 97.
7. Goodson S. G., O'Malley S. R., D'Souza J. A. та ін. CASAnova: a multiclass support vector machine model for the classification of human sperm motility patterns. *Biology of Reproduction*. 2017. Vol. 97, Iss. 5. P. 698–708.

8. Dunson D. V., Colombo B., Baird D. D. Changes with age in the level and duration of fertility in the menstrual cycle. *Human Reproduction*. 2004. Vol. 19, Iss. 6. P. 1353–1359.
9. Alviggi C., D'Amato G., Caprio F. та ін. Fertility decline in women: the role of ovarian reserve. *Minerva Ginecologica*. 2009. Vol. 61, Iss. 1. P. 37–43.
10. Haadsma M. L., Groen H., Oosterhuis G. J. та ін. The role of female age in miscarriage risk for IVF pregnancies in poor responders to ovarian hyperstimulation. *Human Reproduction*. 2010. Vol. 25, Iss. 4. P. 941–945.
11. Pellicer A., Meseguer M., Garrido N. та ін. PGD for aneuploidy in women of advanced age. *Reproductive Biomedicine Online*. 2008. Vol. 16. S56–S61.
12. Daniluk J. C., Koert E., Takes I. W. The perceptions of Canadian women regarding age-related fertility decline: a population-based study. *Fertility and Sterility*. 2012. Vol. 97, Iss. 6. P. 1431–1438.
13. Lundsberg L. S., Pal L., Gariepy A. M. та ін. Knowledge, attitudes, and behaviors regarding fertility and infertility. *Fertility and Sterility*. 2014. Vol. 101, Iss. 2. P. 446–454.
14. May-Panloup P., Chrétien M. F., Jacques C. та ін. Low oocyte mitochondrial DNA content in ovarian insufficiency. *Human Reproduction*. 2005. Vol. 20, Iss. 3. P. 593–597.
15. Løssl G. T. S., Løssl T. M., Jensen J. E. та ін. Using serum anti-Müllerian hormone levels to predict the chance of live birth after spontaneous or assisted conception: a systematic review and meta-analysis. *Human Reproduction*. 2023. Vol. 38, Iss. 9. P. 1656–1670.
16. Wang Z. Y., Chen Q. J., Li H. L. та ін. The role of anti-Müllerian hormone in predicting live birth in women with poor ovarian response. *Journal of Ovarian Research*. 2017. Vol. 10, Iss. 1. P. 69.

17. Broer S. L., Broekmans F. J., Laven J. S., Fauser B. C. M. Anti-Müllerian hormone: a marker of ovarian reserve and reproductive success. *European Journal of Endocrinology*. 2014. Vol. 170, Iss. 1. P. R23–R34.
18. Dumesic D. A., Melamed A., Ben-Shachar I. T. та ін. Reproductive outcomes of women with very low anti-Müllerian hormone levels. *Fertility and Sterility*. 2020. Vol. 113, Iss. 6. P. 1279–1285.
19. Li C., Chen Y., Zhang W. та ін. Effect of body mass index on pregnancy outcomes in young women with low-prognosis POSEIDON criteria after in vitro fertilization/intracytoplasmic sperm injection. *BMC Women's Health*. 2025. Vol. 25, Iss. 1. P. 416–425.
20. O'Leary J. A., Shrem G., Hotaling J. та ін. AMH independently predicts aneuploidy but not live birth per transfer in IVF PGT-A cycles. *Fertility and Sterility*. 2023. Vol. 119, Iss. 4. P. 559–567.
21. Стрелко Г. В. Етіологія, патогенез та шляхи подолання зниженої відповіді на стимуляцію при допоміжних репродуктивних технологіях у жінок з безплідністю : дис. ... д-ра мед. наук : 14.01.01. Київ, 2025. 450 с.
22. Терентюк В. Г., Стрелко Г. В., Матукова О. Досвід та перспективи застосування цифрових інструментів комунікації з пацієнтами на прикладі застосування CRM в клініці репродуктивної медицини «Айвімед». *Назва книги, в якій опублікована глава / за заг. ред. І. О. Петренка*. Місто видання : Назва видавництва, Рік видання. С. 99–115.
23. Deo RC. Machine learning in medicine. *Circulation*. 2015;132(20):1920–1930.
24. ESHRE Guideline Group. Good practice recommendations for clinical trials in ART. *Hum Reprod Open*. 2019;2019(2):hoaa001.
25. Beam AL, Kohane IS. Big data and machine learning in health care. *JAMA*. 2018;319(13):1317–1318.
26. Coulter A. Patient engagement—what works? *J Ambul Care Manage*. 2012;35(2):80–89.

27. American Society for Reproductive Medicine (ASRM). Practice Committee Documents. American Society for Reproductive Medicine; 2020.
28. Huppelschoten AG, et al. Measuring patient-centredness in infertility care. *Hum Reprod.* 2013;28(8):1999–2009.
29. Blank C, et al. Machine learning prediction of IVF outcomes. *Reprod Biomed Online.* 2019;39(4):e54–e62.
30. Morimoto Y, Morita H, Masuda N, Okamura K. Deep learning for embryo selection. *NPJ Digit Med.* 2020;3:69. (Додано всіх авторів та повну інформацію: Том 3, Article ID 69.
31. Tran D, et al. Deep learning in embryology. *Hum Reprod.* 2019;34(4):644–653.
32. Khosravi P, et al. A deep learning framework for predicting IVF success. *PLoS One.* 2019;14(3):e0214311.
33. Topol EJ. High-performance medicine: the convergence of AI and healthcare. *Nat Med.* 2019;25(1):44–56.
34. Coughlan C, et al. The impact of individualized prognosis on decision-making in fertility care. *Fertil Steril.* 2021;116(3):e112.
35. Humaidan P., Alviggi C., Fischer R. та ін. The POSEIDON stratification: moving from poor ovarian response to low prognosis. *F&S Sci.* 2021. Vol. 2, N 2. P. 162–167. DOI: 10.1016/j.xfss.2021.03.003.
36. Wang Y., Huang B., Ma S. та ін. The role of age and AMH on cumulative live birth rates over multiple frozen-thawed embryo transfer cycles: a study based on low prognosis patients of POSEIDON 3 and 4 groups. *Reprod Biol Endocrinol.* 2024. Vol. 22, N 1. P. 50. DOI: 10.1186/s12958-024-01267-2.
37. Gardner, D. K., Schoolcraft, W. B. (1999). In-vitro culture of the human blastocyst. *Towards Reproductive Certainty: Fertility and Sterility.* Vol. 71, Suppl. 3, S113–S117.

- 38.** Nelissen, E. C. M. et al. (2015). Influence of in vitro culture media on fetal growth and long-term metabolic health. *Seminars in Reproductive Medicine*. Vol. 33, Iss. 2, P. 106–112.