

Перизат Маратқызы Рахметова* – PhD кандидат, старший преподаватель кафедры Робототехники и технических средств автоматизации, Satbayev University, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: p.rakhmetova@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5645-5157>.

Авторлар туралы мәліметтер

Мейіржан Қойбағарұлы Қойбағаров – Робототехниканың және техниканың автоматтық құралдары кафедрасының магистранты, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: koybagarov01@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0006-1858-7534>.

Жанібек Назарбекұлы Исабеков – PhD, Робототехниканың және техниканың автоматтық құралдары кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: z.issabekov@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2900-8025>.

Лаззат Амановна Курманғалиева – техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Робототехниканың және техниканың автоматтық құралдары кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: lezzet@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2922-2518>.

Винера Канапиявна Байтурганова – магистр, Робототехниканың және техниканың автоматтық құралдары кафедрасының аға оқытушысы, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: v.baiturganova@satpayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1717-5041>.

Перизат Маратқызы Рахметова* – PhD кандидаты, Робототехниканың және техниканың автоматтық құралдары кафедрасының аға оқытушысы, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: p.rakhmetova@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5645-5157>.

Information about the authors

Meiirzhan Koibagaruly Koibagarov – masters of Department of Robotics and Technical Means of Automation, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: koybagarov01@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0006-1858-7534>.

Zhanibek Issabekov – PhD, Associate Professor of the Department of Robotics and Technical Means of Automation, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: z.issabekov@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2900-8025>.

Lazzat Kurmangaliyeva – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Robotics and Technical Means of Automation, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: lezzet@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2922-2518>.

Vinera Baiturganova – master, senior lecturer of the Department of Robotics and technical means of automation, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: v.baiturganova@satpayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1717-5041>.

Perizat Rakhmetova* – PhD candidate, senior lecturer of the Department of Robotics and technical means of automation, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: p.rakhmetova@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5645-5157>.

Поступила в редакцию 04.04.2025

Поступила после доработки 25.05.2025

Принята к публикации 26.05.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-2\(18\)-15](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-2(18)-15)

МРНТИ: 28.23.01



**А.М. Сыдыкова*, С.М. Женис, С.К. Кумаргажанова, А.С. Тлебалдинова,
Р.К. Нурсадыкова**

Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
070004, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 19
*e-mail: aizhansydyk@gmail.com

АВТОМАТИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ СТАДИЙ ЭМБРИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Аннотация: В данной статье была предложена структурная схема управления информационными потоками в информационно-аналитической системе поддержки принятия решений (ИСППР) для эмбриологов и врачей репродуктивной медицины на основе искусственного интеллекта (ИИ). Данная система позволит оптимизировать работу врачей репродуктивных центров и повысить эффективность программ с использованием вспомогательных репродуктивных технологий (ВРТ) за счет предоставления рекомендаций по проведению/корректировке протоколов, автоматической классификации эмбрионов по стадиям

эмбрионального развития, рекомендации по выбору эмбрионов с учетом генетических аномалий. Проведен литературный обзор работ, авторы которых ранее разрабатывали системы с применением ИИ в репродуктивной медицине. В ходе обзора рассмотрены примененные методы и модели для различных задач, таких как оценка плоидности эмбрионов, определение наиболее жизнеспособного эмбриона, оценка имплантационного потенциала эмбриона, прогнозирование наступления беременности и живорождения. Разработан прототип одного из модулей ИСППР по анализу эмбриональных изображений для автоматизированной классификации стадии развития эмбрионов на основе их визуальных характеристик. В будущем планируется дополнение других модулей системы, обработка больших объемов данных и проведение апробации в условиях реальной клинической практики.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, компьютерное зрение, анализ изображений

Введение

Проблема бесплодия становится всё более актуальной из-за ежегодного увеличения числа женщин и мужчин, сталкивающихся с этим состоянием. Частота бесплодного брака в Республике Казахстан колеблется от 12,0 до 15,5% [1]. А по данным ВОЗ около 17,5% взрослого населения в мире страдает от бесплодия, это почти каждый 6-й человек. Одним из действенных решений проблемы бесплодия в репродуктивной медицине является использование вспомогательных репродуктивных технологий (ВРТ), включая экстракорпоральное оплодотворение (ЭКО) [2].

Хотя число программ ВРТ в стране увеличивается, многие процессы в репродуктивных центрах, включая сбор анамнеза, обработка информации, отбор эмбрионов, диагностика патологий, прогнозирование исхода ЭКО, не применяют или частично применяют автоматизированные технологии на основе искусственного интеллекта. Это приводит к большой нагрузке врачей и эмбриологов репродуктивных центров, а также к субъективности принятия решений.

Основная цель информационной системы поддержки принятия решений (ИСППР) для эмбриологов и врачей репродуктивной медицины на основе искусственного интеллекта является выдача рекомендаций врачам-репродуктологам при ведении протоколов ЭКО, рекомендаций эмбриологам при отборе зуплоидных эмбрионов без генетических патологий. Это позволит повысить эффективность программ ВРТ и оптимизировать работу соответствующих сотрудников центров репродукции.

Обзор литературы

Протокола ЭКО состоят из нескольких этапов. Этапы, которые будут рассматриваться в рамках данного исследования: сбор основных клинических данных пациенток, на основе этих данных назначение гормональных препаратов для стимуляции овуляции, получение ооцитов, культивирование эмбрионов в инкубаторе, выявление эмбрионов с анеуплоидией.

В ходе исследования был проведен обзор отечественной и зарубежной литературы, где рассматриваются системы с использованием алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ) в программах ЭКО.

Поиск статей осуществлялся через научные базы. Согласно проведенному обзору разработка ИС с применением технологий ИИ для репродуктивной медицины довольно актуальна. В целом подобные ИС применяются при анализе данных пациентов для выдачи рекомендаций и персонализации протокола, при оценки качества эмбрионов, прогнозировании результатов программ ВРТ, генетическом анализе эмбрионов.

К примеру, авторы работ [3, 7-10, 14] разрабатывали модели для оценки плоидности эмбрионов на основе видеоданных инкубаторов покадровой съемки. Huang B. et al [3] использовали метод сквозного глубокого обучения на основе 3D сверточной сети. De Gheselle S. et al [7] применили 5 различных методов – классификатор случайного леса, градиентный бустинг, метод опорных векторов, многомерной логистической регрессии, наивный алгоритм Байеса. Barnes J. et al. [9] – метод опорных векторов, классификатор случайного леса, экстремальный градиентный бустинг. Raudonis V. et al. [8], Diakiw S. et al. [10], Chavez-Badiola A. et al. [14], Chen, Tsung-Jui et al. [13] применили метод сверточных нейронных сетей.

Mushtaq, A. et al. [5] рассмотрели задачу сегментации морфологических компонентов эмбриона для определения наиболее жизнеспособного. Авторы [16] решали задачу формирования морфодинамического профиля эмбрионов с целью оценки имплантационной

способности. В обеих работах использовались модели с разной архитектурой нейронных сетей.

В ряде работ [4, 7, 10, 11] авторами был сделан вывод, что клинические данные в совокупности с изображениями эмбрионов могут улучшить эффективность прогнозирования плоидного статуса бластоцист.

Chen, Tsung-Jui et al. [13] классифицировали эмбрионы с помощью разработанной ИС на основе ИИ, а затем провели сравнение с ручной оценкой эмбриологов.

Авторы [4, 11, 12, 14] в исследованиях для отбора в дополнение к изображениям эмбрионов использовали данные предимплантационного генетического тестирования эмбрионов 5-го дня.

Yasunari Miyagi et al. [6] анализировали изображения эмбрионов для прогнозирования живорождения. Бегимбаева А. и др. [15] спрогнозировали частоту наступления беременности в программах ВРТ.

Основная задача подобных систем состоит в том, чтобы сократить время на анализ данных, уйти от ручного процесса отбора эмбрионов, который может быть субъективным, а также имеет временные и трудо-затраты, улучшить результаты протоколов. Способ неинвазивной оценки эмбрионов на стадии культивирования с помощью ИИ в совокупности с другими клиническими данными пациентов имеет огромный потенциал для оптимизации работы эмбриологов и репродуктологов, повышения точности и надежности отбора, а также снижения стоимости процедур ЭКО.

Методология исследования и обсуждение

Предлагаемая ИСППР для эмбриологов и врачей репродуктивной медицины на основе ИИ использует методы:

- 1) машинное глубокое обучение на основе сверточных нейронных сетей для анализа изображений эмбрионов;
- 2) метод обработки естественного языка для анализа медицинских данных и извлечения ключевых данных;
- 3) метод глубокого обучения на основе сверточных сетей для ранжирования эмбрионов по качеству по шкале Гарднера;
- 4) нейронные сети для классификации эмбрионов по данным PGT-A тестирования способом высокопроизводительного секвенирования (NGS).

При этом решаются задачи классификации, сегментации, обнаружения объектов и прогнозирования. К примеру, оценка эмбрионов, статуса плоидности, прогнозирование числа ооцитов и др.

ИСППР для эмбриологов и врачей репродуктивной медицины на основе искусственного интеллекта использует клинические данные пациенток, данные протоколов ВРТ, видеофайлы с инкубатора показывающей съемки и результаты анализов PGT-A тестирования. В результате проведенного обзора, а также выявления потребностей врачей одного из репродуктивных центров города Астана была разработана структурная схема управления информационными потоками в информационно-аналитической системе, которая показана на рисунке 1.

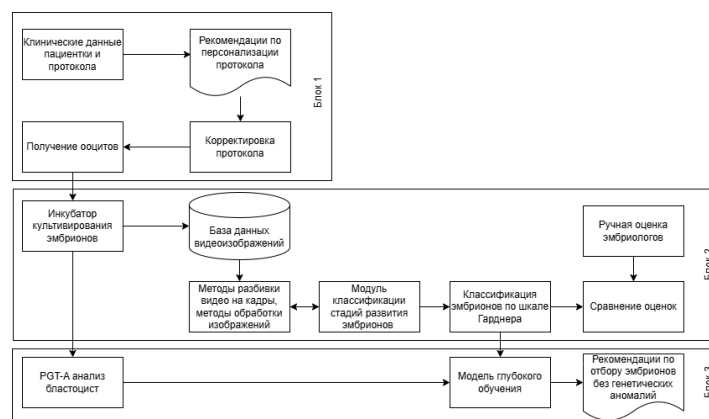


Рисунок 1 – Структурная схема управления информационными потоками в информационно-аналитической системе

Первый блок представляет собой модуль для репродуктолога, где на основе клинических данных пациентки и данных протокола (возраст матери, количество полученных ооцитов, АМГ, ФСГ, ЛГ, фактор бесплодия – мужской/женский, тип протокола – короткий/длинный, вид протокола – крио/свежий, медикаменты для протокола) выдается рекомендация для персонализации протокола пациентки и осуществляется корректировка протокола. Полученные в протоколе стимуляции ооциты проходят этап оплодотворения.

Во втором блоке полученные эмбрионы, помещенные в инкубатор покадровой съемки, культивируются до 5-го дня и сохраняются видеоизображения процесса культивирования эмбрионов в виде файлов формата *.avi. Для автоматизации процесса разбивки видео на кадры выбраны Python-библиотеки. Для автоматической классификации стадии развития эмбрионов на основе их визуальных характеристик выбран метод сверточных нейронных сетей ResNet50.

Далее решается задача классификации для автоматической классификации эмбрионов по шкале Гарднера. К модели добавляются дополнительные параметры, а именно кинетические параметры развития эмбриона, а также анамнез пациента. Таким образом, использование гибридной модели поможет учесть морфологию и развитие эмбриона по времени, выявить корреляцию относительно истории болезни пациента.

В третьем блоке бластоцисты, полученные в процессе культивирования эмбрионов до 5-го дня направляются на генетическое тестирование PGT-A. Данные анализа вводятся в систему и выдаются рекомендации для отбора качественных эмбрионов без патологий.

Перед подачей изображений эмбрионов в нейронную сеть была выполнена их предварительная обработка с использованием ряда последовательных преобразований для обучающей, валидационной и тестовой выборок.

Для обучающей выборки применялись следующие преобразования:

- 1) Преобразование каждого изображения в трехканальное представление в градациях серого цвета. Это было необходимо для обеспечения совместимости с архитектурой ResNet, которая ожидает трехканальные входные данные;

- 2) Изменение разрешения всех изображений до стандартного размера 224x224 пикселей, что является общепринятым требованием для входного слоя многих сверточных нейронных сетей, включая ResNet;

- 3) Применение случайного горизонтального отражения с вероятностью 0.2. Данный метод аугментации данных помогает увеличить разнообразие обучающей выборки и повысить устойчивость модели к горизонтальным изменениям в изображениях;

- 4) Случайное изменение яркости изображений в пределах заданного диапазона. Это также является методом аугментации, направленным на улучшение робастности модели к вариациям освещения;

- 5) Преобразование обработанных изображений в тензоры PyTorch, являющиеся основным типом данных для работы в данной библиотеке;

- 6) Нормализация значений пикселей тензоров с использованием средних и стандартных отклонений, предварительно рассчитанных на большом наборе данных ImageNet.

Для валидационной и тестовой выборок применялся схожий набор преобразований, за исключением вероятности случайного горизонтального отражения, которая была установлена на уровне 0.5.

Для эффективной загрузки и обработки данных использовались DataLoader'ы PyTorch. Исходный набор данных был предварительно разделен на три подмножества: обучающее (80%), валидационное (10%) и тестовое (10%). Разделение производилось с фиксированным случайным состоянием (random_state=42) для обеспечения воспроизводимости результатов. Для каждого из этих подмножеств был создан свой экземпляр DataLoader с размером батча, равным 8. При этом для обучающего загрузчика было включено перемешивание данных.

Результаты

На данном этапе исследований реализована модель автоматической классификации стадии развития эмбрионов на основе их визуальных характеристик. В качестве основной архитектуры нейронной сети была выбрана предобученная модель ResNet50. Использование предварительно обученных весов, полученных на большом наборе данных ImageNet, позволяет модели быстрее адаптироваться к новой задаче классификации эмбрионов за счет

уже сформированных низкоуровневых и среднеуровневых признаков. Последний полносвязный слой (классификатор) исходной модели ResNet50 был заменен на новый линейный слой с количеством выходных нейронов, соответствующим числу классов в нашем наборе данных. Обученная модель была размещена на графическом процессоре (GPU) при наличии поддержки CUDA, что значительно ускоряет вычислительные процессы.

В процессе обучения использовался алгоритм оптимизации Adam с начальной скоростью обучения 0.001. Функция потерь, которая использовалась для оценки разницы между предсказаниями модели и истинными метками классов, была выбрана как кросс-энтропия, стандартная для задач многоклассовой классификации. Для динамической регулировки скорости обучения в процессе тренировки применялся планировщик ReduceLROnPlateau. Данный планировщик уменьшает скорость обучения, если в течение двух последовательных эпох не наблюдается улучшения метрики (в данном случае, точности на валидационной выборке). Процесс обучения был ограничен 10 эпохами. Каждая эпоха включала в себя фазы обучения и валидации. В фазе обучения модель переводилась в режим тренировки, вычислялись потери и точность на обучающей выборке. Для ускорения вычислений и снижения потребления памяти GPU применялось смешанное обучение с плавающей точкой (torch.amp.GradScaler). Для каждого пакета данных выполнялся прямой проход, рассчитывалась функция потерь, производилось обратное распространение ошибки и обновлялись веса модели с помощью оптимизатора. Прогресс обучения визуализировался с использованием библиотеки tqdm. В фазе валидации модель переводилась в режим оценки, и на валидационной выборке без вычисления градиентов оценивались потери и точность. На основе полученной точности планировщик скорости обучения мог изменять текущую скорость обучения. По завершении каждой эпохи выводилась сводная информация о производительности модели на обучающей и валидационной выборках. Лучшая версия модели, определенная на основе максимальной точности на валидационной выборке, сохранялась в файл .pth. Сохранялись не только веса модели, но и состояние оптимизатора, планировщика, номер эпохи и достигнутая точность на валидации. После завершения процесса обучения проводилось тестирование итоговой модели. Модель переводилась в режим оценки, и на тестовой выборке, аналогично фазе валидации, без вычисления градиентов оценивались потери и точность. Полученные средние значения потерь и итоговая точность на тестовой выборке выводились в качестве результатов тестирования.

Отчет о классификации для обученной модели представлен на рисунке 2.

Classification Report:				
	precision	recall	f1-score	support
t2	0.96	0.84	0.89	1000
t3	0.86	0.95	0.90	1000
t4	0.88	0.89	0.88	1000
t5	0.89	0.92	0.91	1000
t6	0.89	0.88	0.89	1000
t7	0.87	0.90	0.88	1000
t8	0.93	0.79	0.85	1000
t9+	0.85	0.80	0.83	1000
tB	0.84	0.93	0.88	1000
tEB	0.90	0.90	0.90	1000
tM	0.83	0.88	0.85	1000
tPB2	0.88	0.95	0.92	1000
tPNa	0.92	0.89	0.91	1000
tPNf	0.92	0.89	0.90	1000
tSB	0.86	0.84	0.85	1000
accuracy			0.88	15000
macro avg	0.89	0.88	0.88	15000
weighted avg	0.89	0.88	0.88	15000

Рисунок 2 – Отчет о классификации для обученной модели

По результатам видно, что модель демонстрирует довольно высокие показатели precision (точность) и recall (чувствительность) для большинства классов, что приводит к хорошим значениям f1-score. Общая точность модели составляет 88%, что является достаточно высоким показателем. Значения macro avg и weighted avg также равны 0.88, что подтверждает сбалансированную производительность модели по всем классам, учитывая их одинаковое представление в тестовом наборе. Некоторые классы показывают немного более низкие значения f1-score по сравнению с другими (например, t8 с f1-score 0.85 и t9+ с f1-score

0.83), что может указывать на то, что модель немного хуже справляется с классификацией объектов именно этих классов.

Также для оценки модели была выполнена матрица ошибок (confusion matrix). Это таблица (рис. 3), где строки соответствуют истинным меткам (True Labels), а столбцы - предсказанным меткам (Predicted Labels). Значения по диагонали показывают количество корректно классифицированных объектов для каждого класса. Чем выше значения на диагонали и чем ниже значения вне диагонали, тем лучше работает модель.

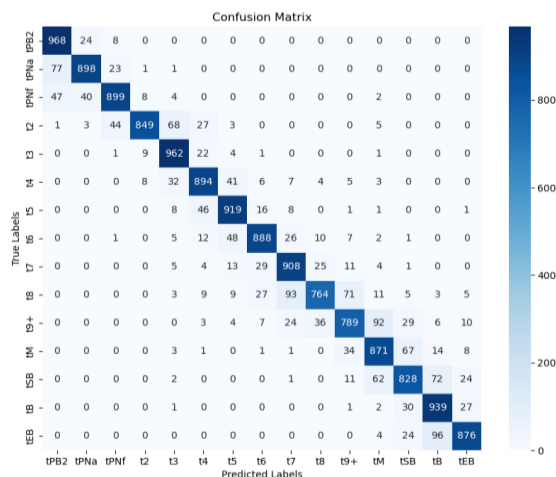


Рисунок 3 – Матрица ошибок обученной модели

Общая высокая точность подтверждается – большинство верно классифицированных случаев сконцентрированы вдоль диагонали. Однако матрица дает более детальное представление какие именно классы модель путает между собой.

Модель демонстрирует хорошие результаты классификации для многих этапов развития эмбрионов, что подтверждается большим количеством верно классифицированных случаев (высокие значения по диагонали). Классы t3, t4, t5, t6, t7, tEB и tPB2 имеют очень высокие значения на диагонали (например, 962 для t3, 888 для t5, 939 для tEB, 968 для tPB2), что свидетельствует о высокой точности классификации этих этапов. Модель уверенно распознает эмбрионы, находящиеся на этих стадиях. Ошибки классификации между соседними этапами развития (например, t2 и t3/t4, t7 и t8/t9+) связаны с постепенностью морфологических изменений между этими стадиями. Ошибки классификации между не смежными классами (например, tM и tSB) указывают на наличие схожих визуальных признаков на определенных стадиях.

Заключение

В статье предложена структурная схема управления информационными потоками в информационно-аналитической системе поддержки принятия решений для эмбриологов и врачей репродуктивной медицины на основе искусственного интеллекта, направленная на повышение эффективности программ ВРТ и оптимизирование работы врачей центров репродукции. Рассмотрены информационные системы на основе ИИ, которые ранее были применены в репродуктивной медицине, включая использованные методы и модели машинного обучения. Разработан прототип модуля анализа изображений эмбрионов на основе модели компьютерного зрения, спроектированная для автоматизированной классификации стадии развития эмбрионов на основе их визуальных характеристик. Экспериментальная оценка разработанной модели продемонстрировала многообещающие результаты, достигнув точности классификации в 89%.

Полученные результаты свидетельствуют о значительном потенциале применения технологий глубокого обучения в области вспомогательных репродуктивных технологий. Дальнейшие исследования будут направлены на совершенствование архитектуры модели, расширение объема обучающей выборки, добавлением новых модулей, расширение функциональных возможностей системы и проведение апробации в условиях реальной клинической практики.

Список литературы

1. Lokshin V. Assisted Reproductive Technologies in the Republic of Kazakhstan: A 6-Year Trend Analysis from Efficacy to Availability / V. Lokshin, M. Omar, S. Karibaeva // J.Reproduction & Infertility. – 2022. – № 23. – P. 61-66. <https://www.jri.ir/article/120131>.
2. Петрова Е.В. Основные этапы преодоления бесплодия с использованием программы вспомогательных репродуктивных технологий и ее модификаций / Е.В. Петрова, С.И. Михалевич // Медицинские новости. – 2012. – № 2. – P. 45.
3. An artificial intelligence model (euploid prediction algorithm) can predict embryo ploidy status based on time-lapse data / B. Huang et al // Reproductive Biology and Endocrinology. – 2021. – № 19. – P. 185. <https://doi.org/10.1186/s12958-021-00864-4>.
4. Can the combination of time-lapse parameters and clinical features predict embryonic ploidy status or implantation? / Y. Zou et al // Reprod Biomed Online. – 2022. – № 45(4). – P. 643-651. <https://doi.org/10.1016/j.rbmo.2022.06.007>.
5. Artificial Intelligence-Based Detection of Human Embryo Components for Assisted Reproduction by In Vitro Fertilization / A. Mushtaq et al // Sensors. – 2022. – № 22. – P. 7418. <https://doi.org/10.3390/s22197418>
6. Feasibility of artificial intelligence for predicting live birth without aneuploidy from a blastocyst image / M. Yasunari et al // Reproductive medicine and biology. – 2019. <https://doi.org/10.1002/rmb2.12267>.
7. Machine learning for prediction of euploidy in human embryos: in search of the best-performing model and predictive features / S. De Gheselle et al // Fertility and Sterility. – 2022. – № 117(4). – P. 0015-0282. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2021.11.029>.
8. Towards the automation of early-stage human embryo development detection / V. Raudonis et al // BioMedical Engineering OnLine. – 2019. – № 18. – P. 120. <https://doi.org/10.1186/s12938-019-0738-y>.
9. A non-invasive artificial intelligence approach for the prediction of human blastocyst ploidy: a retrospective model development and validation study / J. Barnes, et al // The Lancet Digital Health. – 2023. – № 5(1). – P. e28-e40. [https://doi.org/10.1016/S2589-7500\(22\)00213-8](https://doi.org/10.1016/S2589-7500(22)00213-8).
10. Development of an artificial intelligence model for predicting the likelihood of human embryo euploidy based on blastocyst images from multiple imaging systems during IVF / S. Diakiw et al // Human Reproduction. – 2022. – Vol 30, № 37(8). – P. 1746-1759. <https://doi.org/10.1093/humrep/deac131>.
11. The use of voting ensembles to improve the accuracy of deep neural networks as a non-invasive method to predict embryo ploidy status / V. Jiang et al // Journal of Assisted Reproduction and Genetics. – 2023. – № 40. – P. 301-308. <https://doi.org/10.1007/s10815-022-02707-6>.
12. Development of an artificial intelligence based model for predicting the euploidy of blastocysts in PGT-A treatments / Z. Yuan et al // Scientific Reports. – 2023. – № 13. – P. 2322. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29319-z>.
13. Using Deep Learning with Large Dataset of Microscope Images to Develop an Automated Embryo Grading System / Chen et al // Fertility & Reproduction. – 2019. – № 01(01). – P. 1-6. <https://doi.org/10.1142/S2661318219500051>.
14. Embryo Ranking Intelligent Classification Algorithm (ERICA): artificial intelligence clinical assistant predicting embryo ploidy and implantation / A. Chavez-Badiola et al // Reprod Biomed Online. – 2020. – № 41(4). – P. 585-593. <https://doi.org/10.1016/j.rbmo.2020.07.003>.
15. Искусственный интеллект – ключ к развитию эмбриологической лаборатории / А. Бегимбаева и др. // Репродуктивная медицина (Центральная Азия). – 2024. – № 3. – P. 42-49. <https://doi.org/10.37800/RM.3.2024.42-49>.

References

1. Lokshin V. Assisted Reproductive Technologies in the Republic of Kazakhstan: A 6-Year Trend Analysis from Efficacy to Availability / V. Lokshin, M. Omar, S. Karibaeva // J.Reproduction & Infertility. – 2022. – № 23. – R. 61-66. <https://www.jri.ir/article/120131>. (In English).
2. Petrova E.V. Osnovnye ehtapy preodoleniya besplodiya s ispol'zovaniem programmy vspomogatel'nykh reproduktivnykh tekhnologii i ee modifikatsii / E.V. Petrova, S.I. Mikhalevich // Meditsinskie novosti. – 2012. – № 2. – R. 45. (In Russian).
3. An artificial intelligence model (euploid prediction algorithm) can predict embryo ploidy status based on time-lapse data / V. Huang et al // Reproductive Biology and Endocrinology. – 2021. – № 19. – R. 185. <https://doi.org/10.1186/s12958-021-00864-4>. (In English).

4. Can the combination of time-lapse parameters and clinical features predict embryonic ploidy status or implantation? / Y. Zou et al // *Reprod Biomed Online*. – 2022. – № 45(4). – R. 643-651. <https://doi.org/10.1016/j.rbmo.2022.06.007>. (In English).
5. Artificial Intelligence-Based Detection of Human Embryo Components for Assisted Reproduction by In Vitro Fertilization / A. Mushtaq et al // *Sensors*. – 2022. – № 22. – R. 7418. <https://doi.org/10.3390/s22197418>. (In English).
6. Feasibility of artificial intelligence for predicting live birth without aneuploidy from a blastocyst image / M. Yasunari et al // *Reproductive medicine and biology*. – 2019. <https://doi.org/10.1002/rmb2.12267>. (In English).
7. Machine learning for prediction of euploidy in human embryos: in search of the best-performing model and predictive features / S. De Gheselle et al // *Fertility and Sterility*. – 2022. – № 117(4). – R. 0015-0282. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2021.11.029>. (In English).
8. Towards the automation of early-stage human embryo development detection / V. Raudonis et al // *BioMedical Engineering OnLine*. – 2019. – № 18. – R. 120. <https://doi.org/10.1186/s12938-019-0738-y>. (In English).
9. A non-invasive artificial intelligence approach for the prediction of human blastocyst ploidy: a retrospective model development and validation study / J. Barnes, et al // *The Lancet Digital Health*. – 2023. – № 5(1). – R. e28-e40. [https://doi.org/10.1016/S2589-7500\(22\)00213-8](https://doi.org/10.1016/S2589-7500(22)00213-8). (In English).
10. Development of an artificial intelligence model for predicting the likelihood of human embryo euploidy based on blastocyst images from multiple imaging systems during IVF / S. Diakiw et al // *Human Reproduction*. – 2022. – Vol 30, № 37(8). – R. 1746-1759. <https://doi.org/10.1093/humrep/deac131>. (In English).
11. The use of voting ensembles to improve the accuracy of deep neural networks as a non-invasive method to predict embryo ploidy status / V. Jiang et al // *Journal of Assisted Reproduction and Genetics*. – 2023. – № 40. – R. 301-308. <https://doi.org/10.1007/s10815-022-02707-6>. (In English).
12. Development of an artificial intelligence based model for predicting the euploidy of blastocysts in PGT-A treatments / Z. Yuan et al // *Scientific Reports*. – 2023. – № 13. – R. 2322. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29319-z>. (In English).
13. Using Deep Learning with Large Dataset of Microscope Images to Develop an Automated Embryo Grading System / Chen et al // *Fertility & Reproduction*. – 2019. – № 01(01). – R. 1-6. <https://doi.org/10.1142/S2661318219500051>. (In English).
14. Embryo Ranking Intelligent Classification Algorithm (ERICA): artificial intelligence clinical assistant predicting embryo ploidy and implantation / A. Chavez-Badiola et al // *Reprod Biomed Online*. – 2020. – № 41(4). – R. 585-593. <https://doi.org/10.1016/j.rbmo.2020.07.003>. (In English).
15. Iskusstvennyi intellekt – klyuch k razvitiyu ehmbriologicheskoi laboratorii / A. Begimbaeva i dr. // *Reproduktivnaya meditsina (Tsentral'naya Aziya)*. – 2024. – № 3. – R. 42-49. <https://doi.org/10.37800/RM.3.2024.42-49>. (In English).

Информация о финансировании

Работа выполнена при поддержке грантового финансирования научных и (или) научно-технических проектов на 2024-2026 годы Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №AP23486396 «Модели и методы распознавания анатомических структур на изображениях МРТ в задачах компьютерной диагностики»).

А.М. Сыдықова*, С.М. Жеңіс, С.Қ.Құмарғажанова, А.С.Тлебалдинова, Р.Қ.Нұрсадықова

Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті

070004, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., Серікбаев к., 19

*e-mail: aizhansydyk@gmail.com

МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ӘДІСТЕРІНІҢ НЕГІЗІНДЕГІ ЭМБРИОН ДАМУ КЕЗЕҢДЕРІНІҢ АВТОМАТТЫ ЖІКТЕЛУІ

Бұл мақала жасанды интеллект (ЖИ) негізіндегі эмбриологтар мен репродуктивті медицина дәрігерлері үшін ақпараттық және аналитикалық шешімдерді қолдау жүйесінде ақпарат ағындарын басқарудың құрылымдық схемасын ұсынады. Жұмыс «Репродуктивті медицинадағы патологияларды диагностикалаудың ақпараттық жүйесі» тақырыбы бойынша докторлық диссертацияны зерттеу барысында әзірленген. Жүйе репродуктивті орталықтардағы

дәрігерлердің жұмысын оңтайландырады және хаттамаларды енгізу/түзету, Гарднер шкаласы бойынша эмбриондарды автоматты түрде бағалау, генетикалық ауытқуларды ескере отырып, эмбриондарды таңдау бойынша ұсыныстар беру арқылы көмекші репродуктивті технологияларды пайдаланатын бағдарламалардың тиімділігін арттырады. Бұдан бұрын репродуктивті медицинада ЖИ қолданатын жүйелерді жасаған авторлардың жұмыстарына әдебиеттік шолу жүргізілді. Шолуда эмбриондардың пloidтылығын бағалау, өмір сүру потенциалы жоғары эмбрионды анықтау, эмбрионның имплантация әлеуетін бағалау, жүктіліктің басталуы мен тірі туылуын болжау сияқты өртүрлі мақсатта қолданылатын әдістер мен модельдер қарастырылады. Ақпараттық жүйенің эмбриондардың визуалды сипаттамалары бойынша даму сатысын автоматтандырылған жіктеу үшін эмбриондық бейнелерді талдауға арналған модульдің бірінің прототипі әзірленді. Болашақта жүйенің басқа модульдерін қосу, үлкен көлемдегі деректерді өңдеу және нақты клиникалық тәжірибеде тестілеуді өткізу жоспарлануда.

Түйін сөздер: жасанды интеллект, машиналық оқыту, компьютерлік көру, кескіндерді талдау.

A.M. Sydykova*, S.M. Zhenis, S.K. Kumargazhanova, A.S. Tlebaldinova, R.K. Nursadykova

D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University
070004, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, Serikbayev st., 19
*e-mail: aizhansydyk@gmail.com

AUTOMATIC CLASSIFICATION OF STAGES OF EMBRYO DEVELOPMENT BASED ON MACHINE LEARNING METHODS

This article proposes a structural scheme of information flow management in the information and analytical decision support system (IADSS) for embryologists and reproductive medicine physicians based on artificial intelligence (AI), which was developed during research for a doctoral dissertation entitled "Information System for Diagnosing Pathologies in Reproductive Medicine". This system will optimize the work of physicians in reproductive centers and improve the efficiency of programs using assisted reproductive technologies (ART) by providing recommendations for implementing/adjusting protocols, automatic assessment of embryos according to the Gardner scale, and recommendations for selecting embryos taking into account genetic abnormalities. A literature review of works by authors who previously developed systems using AI in reproductive medicine was conducted. The review considered the methods and models used for various tasks, such as assessing embryo ploidy, determining the most viable embryo, assessing the implantation potential of the embryo, predicting the onset of pregnancy and live birth. A prototype of one of the modules of the IADSS for the analysis of embryonic images for the automated classification of the development stage of embryos based on their visual characteristics has been developed. In the future, it is planned to supplement other modules of the system, process large volumes of data and conduct testing in real clinical practice.

Key words: artificial intelligence, machine learning, computer vision, image analysis.

Сведения об авторах

Айжан Мукатаевна Сыдыкова* – докторант по специальности «Информационные системы», Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск; e-mail: aizhansydyk@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4093-6057>.

Сымбат Маратулы Женис – магистрант 2 курса по специальности Информационные системы, ВКТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск; e-mail: zhenissymbat@gmail.com.

Сауле Кумаргажановна Кумаргажанова – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск; e-mail: skumargazhanova@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6744-4023>.

Айжан Солтангалиевна Тлебалдинова – PhD, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск; e-mail: atlebaldinova@edu.ektu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1271-0352>.

Роза Канашевна Нурсадыкова – старший преподаватель, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск; e-mail: RNursadykova@ektu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9595-6826>.

Авторлар туралы мәліметтер

Айжан Мұқатайқызы Сыдыкова* – «Ақпараттық жүйелер» мамандығының докторанты, Д.Серикбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қаласы; e-mail: aizhansydyk@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4093-6057>.

Сымбат Маратулы Жеңіс – Ақпараттық жүйелер бағдарламасы бойынша 2 курс магистранты, Д. Серикбаев атындағы ШҚТУ, Өскемен қ.; e-mail: zhenissymbat@gmail.com.

Сәуле Құмаргажанқызы Құмаргажанова – т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Д.Серикбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ.; e-mail: skumargazhanova@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6744-4023>.

Айжан Солтангалиевна Тлебалдинова – PhD, қауымдастырылған профессор, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ.; e-mail: atlebaldinova@edu.ektu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1271-0352>.

Роза Қанашқызы Нұрсадықова – аға оқытушы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ.; e-mail: RNursadykova@ektu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9595-6826>.

Information about the authors

Aizhan Sydykova – PhD student in Information Systems, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbayev, Ust-Kamenogorsk; e-mail: aizhansydyk@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4093-6057>.

Zhengis Symbat Maratuly – 2nd year master's student in the specialty Informational systems, D. Serikbaev D. Serikbayev, Ust-Kamenogorsk; e-mail: zhenissymbat@gmail.com.

Saule Kumargazhanova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbayev, Ust-Kamenogorsk; e-mail: skumargazhanova@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6744-4023>.

Aizhan Tlebaldinova – PhD, Associate Professor, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbayev, Ust-Kamenogorsk; e-mail: atlebaldinova@edu.ektu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1271-0352>.

Roza Nursadykova – Senior Lecturer, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbayev, Ust-Kamenogorsk; e-mail: RNursadykova@ektu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9595-6826>.

Поступила в редакцию 23.04.2025

Принята к публикации 28.05.2025