

УДК: 636.5.082.3:591.3:616-073.75
DOI: 10.52419/issn2072-2419.2025.3.364

НЕИНВАЗИВНЫЙ МОНИТОРИНГ ЭМБРИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ УТОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МРТ И КОМПЛЕКСА СРАВНИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ

Тодороски К.¹ – канд. биол. наук, доц. департамента физической культуры, спорта и медиакоммуникаций (ORCID 0000-0003-4908-4316); Ежкова А.М.² – д-р биол. наук, проф., зав. каф. физиологии и патологической физиологии (ORCID 0000-0002-5526-2214); Ежков В.О.² – д-р ветеринар. наук, проф. каф. физиологии и патологической физиологии (ORCID 0000-0001-6476-6054)

¹Московский городской педагогический университет

²Казанский государственный аграрный университет

*kiriltodoroski96@gmail.com

Ключевые слова: визуализация, эмбрион, утка, развитие, рентгенография, МРТ.

Key words: visualization, embryo, duck, development, radiography, MRI.

Поступила: 09.06.2025

Принята к публикации: 26.08.2025

Опубликована онлайн: 15.09.2025



РЕФЕРАТ

Магнитно-резонансная томография (МРТ) продемонстрировала значительный потенциал как современный неинвазивный метод исследования эмбрионального развития у птиц. В данной работе МРТ использовалась в комплексе с традиционными подходами — овоскопией, анатомическим вскрытием и рентгенографией — для комплексного анализа эмбриогенеза уток. В исследование было включено 60 эмбрионов, за развитием которых осуществлялось ежедневное наблюдение с 1-го по 27-й день инкубации. Такой дизайн обеспечил возможность документирования ключевых этапов морфогенеза и сопоставления данных, полученных различными методами визуализации. МРТ позволила с высокой точностью визуализировать сосудистую систему, внутренние органы и формирование скелета, что было особенно информативно на поздних стадиях инкубации. Установлено, что к 22-му дню желточный мешок начинает втягиваться в брюшную полость, а к 27-му дню эмбрион достигает полного формирования и инициирует проклёв скорлупы. Сравнительный анализ подтвердил преимущества МРТ перед традиционными методами в аспекте непрерывного и достоверного мониторинга динамики органогенеза без нарушения целостности яйца. Особое значение имеет возможность раннего выявления морфологических изменений и потенциальных патологий, что открывает перспективы применения метода в фундаментальных исследованиях эмбриологии и в практике птицеводства. Полученные результаты указывают на то, что внедрение МРТ в систему контроля инкубации может способствовать повышению выживаемости эмбрионов, оптимизации технологических режимов и улучшению показателей воспроизводства. Таким образом, МРТ представляет собой эффективный инструмент как для научных исследований, так и для прикладных задач птицеводческой отрасли.

ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION

Эмбриональное развитие у сельскохозяйственной птицы зависит от содержания питательных веществ и энергетических запасов в оплодотворённом яйце, однако успешное выведение требует строго соблюдения условий инкубации, обеспечивающих оптимальное развитие эмбриона [1]. Процесс инкубации включает контроль таких параметров, как температура, влажность и вентиляция в инкубаторе, что необходимо для достижения высокой выводимости [2, 3]. В птицеводстве правильное управление инкубацией имеет ключевое значение для повышения выживаемости и продуктивности потомства [4]. Несмотря на глубокое понимание инкубационных процессов, разработка непрерывных неинвазивных методов мониторинга эмбриогенеза остаётся затруднительной задачей, особенно у видов птиц с длительным инкубационным периодом, таких как утки.

Птичьи эмбрионы имеют значительные преимущества для эмбриологических исследований благодаря доступности, низкой стоимости и относительной простоте обращения и наблюдения [5]. Традиционно исследование эмбрионального развития требовало использования инвазивных методов, в том числе вскрытия яиц для прямого изучения отдельных стадий [6]. Хотя такие методы информативны, они прерывают дальнейшее развитие эмбриона, исключая возможность длительного наблюдения [7]. На ранних этапах жизнеспособность эмбриона часто оценивается по активности сердечно-сосудистой системы, поскольку формирование сердца и сосудов служит важнейшим маркером начала развития [8]. Однако подобные оценки чаще всего предполагают использование вмешивающихся методик, нарушающих нормальное развитие, что ограничивает их применимость для длительных наблюдений [9]. Современные достижения в области визуализирующих технологий способствовали внедрению неинвазивных методов, таких как магнитно-резонансная томография (МРТ), представляющих собой перспек-

тивную альтернативу при изучении эмбриогенеза [10]. МРТ обеспечивает возможность получения высокдетализированных изображений внутренних структур без нарушения целостности яйца, что значительно превосходит традиционные инвазивные подходы [11]. Кроме того, такие методы, как рентгенография и овоскопия, позволяют отслеживать развитие эмбриона и его жизнеспособность на различных этапах инкубации [1, 12]. Несмотря на указанные технологические достижения, комплексная визуализация всего процесса эмбрионального развития у уток, особенно на поздних стадиях, до сих пор недостаточно изучена. Большинство ранее выполненных работ было сосредоточено на ранних этапах эмбриогенеза, что оставляет пробелы в понимании морфологических изменений во второй половине инкубации [16].

Настоящее исследование направлено на восполнение указанного пробела путём использования комплекса методов — МРТ, рентгенографии, овоскопии, анатомического вскрытия и морфометрического анализа — для непрерывной и детальной визуализации эмбрионального развития утиных эмбрионов. Предполагается, что сочетание МРТ с другими методами визуализации, такими как рентгенография и овоскопия, позволит осуществлять неинвазивный мониторинг ключевых параметров развития, включая формирование кровеносной системы, внутренних органов и скелетной структуры. Сравнительный анализ выявит сильные и слабые стороны каждого метода, предоставляя ценные данные как для фундаментальных исследований, так и для практического применения в птицеводстве.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ / MATERIALS AND METHODS

Место проведения исследования. Для достижения поставленных целей были проведены исследования по визуализации эмбрионального развития уток на базе кафедры физиологии и патологической физиологии Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана (далее — КГАВМ), в Кли-

ническом центре КГАВМ, а также в Лаборатории физики Казанского научного центра Российской академии наук (КазНЦ РАН).

Этическое заключение. Протокол исследования был одобрен Этическим комитетом кафедры физиологии и патологической физиологии КГАВМ (номер одобрения: 0069/22). Все манипуляции с эмбрионами соответствовали этическим стандартам [9].

Процесс инкубации. Инкубация 60 отобранных высококачественных оплодотворённых яиц уток пекинской кросс-линии "STAR-53" проводилась в бытовом автоматическом инкубаторе «Matrix VEGAS» D10 (Россия). Перед началом инкубации инкубатор был продезинфицирован средством Incubator-Clean. Параметры окружающей среды были настроены в соответствии с нормативами: температура — 38–38,3 °C, относительная влажность — 75 %, автоматический переворот яиц каждые 3 часа [13].

1–7 суток: температура поддерживалась в диапазоне 38–38,3 °C, влажность — 75 %. С 8 суток: температура понижалась до 37,8 °C, влажность — до 60 %, частота переворота сохранялась. Яйца ежедневно опрыскивались водой с 8 по 14 день [3]. На 18 день инкубатор открывался дважды в день по 20 минут для предотвращения перегрева и гибели эмбрионов. С 19 по 25 день температура составляла 37,8 °C, влажность — 60 %, переворот — каждые 2 часа. На 26 сутки: температура снижалась до 37,5 °C, влажность повышалась до 90 % для размягчения скорлупы, переворот осуществлялся один раз в 3 часа на протяжении трёх дней до момента выведения утят [12].

Регулирование влажности способствовало постепенному испарению воды из яйца, что обеспечивало формирование воздушной камеры и нормальный газообмен, критически важный для жизнеспособности эмбриона и успешного вылупления.

Анатомическая и морфометрическая оценка. Ежедневно проводились анатомические вскрытия и морфометрические

измерения эмбрионов. В анатомических наблюдениях использовались нежизнеспособные эмбрионы, у которых фиксировались структурные изменения на различных стадиях развития [5]. Морфометрия включала определение массы и длины эмбрионов при помощи весов II класса точности 122ACF-1500.05 LCD "Accurate" (Южная Корея) с чувствительностью 0,01 г [4]. Фотофиксация проводилась цифровой камерой высокой чёткости (iPhone 13 Pro, Apple Inc., США) с разрешением 12 Мп.

Рентгенологическое исследование. Рентгенография осуществлялась на аппарате Dongmun DIG-360 (Корея) с плоскостным детектором Rayence 1717 SGC и программным обеспечением Xmaru View V1 [8]. Съёмка проводилась ежедневно в 16:00 в боковой проекции при экспозиции 4 мА·с и напряжении 52 кВ [13]. Метод позволял визуализировать костную систему и расположение органов без нарушения целостности яйца [11].

Магнитно-резонансная томография (МРТ). Томографирование эмбрионов проводилось с использованием специализированного магнитно-резонансного томографа, адаптированного для исследования птичьих эмбрионов диаметром до 60 мм. Исследования выполнялись в Лаборатории методов медицинской физики КФТИ — ОСП ФГБНУ ФИЦ КазНЦ РАН [14, 15].

Аппарат был модифицирован на основе сенсора, изначально предназначенного для диагностики коленного сустава человека, что позволило получить высококонтрастные изображения эмбриона в скорлупе [16]. Метод обеспечивал чёткую визуализацию мягких тканей и органогенеза без необходимости вскрытия яйца. Полученные изображения анализировались с целью отслеживания динамики морфогенеза в неинвазивном режиме.

РЕЗУЛЬТАТЫ / RESULTS

Сравнительный анализ данных анатомических вскрытий и рентгенографических изображений. Методы анатомического вскрытия и рентгенографии позволили зафиксировать структурные измене-

ния и параметры роста эмбрионов на протяжении всей инкубации. На начальных этапах отмечались формирование сосудистой сети и увеличение размеров эмбрионального диска. Рентгенография выявила динамику утончения скорлупы, изменение размеров воздушной камеры и прогрессирующую ossификацию скелета по мере развития.

4-е сутки инкубации. Эмбриональный диск достигал 7,1–8,0 мм; визуализировалась сосудистая сеть, отмечались интенсивные сердечные сокращения (Рис. 1 А–С). Рентгенография позволила различить зоны расположения желтка и белка, а МРТ — детализировать поперечные срезы развивающихся структур.

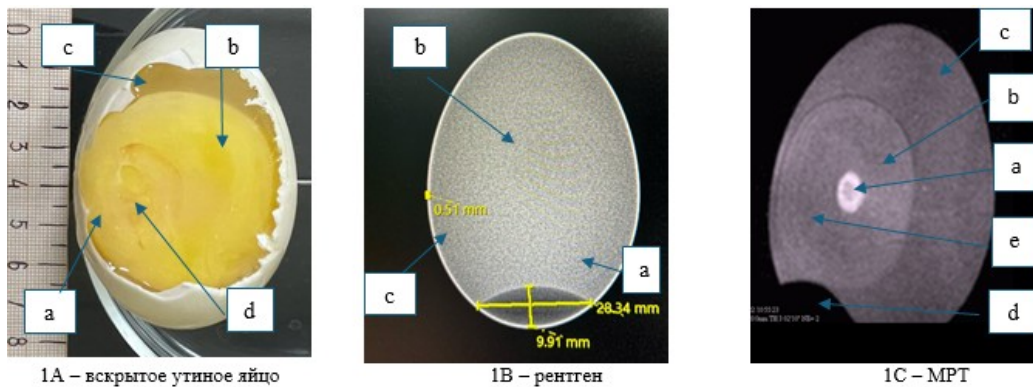


Рисунок 1 (А, В, С) – 4-е сутки инкубации: а — эмбрион, b — желток, с — белок, d — воздушная камера, e — зародышевый диск.

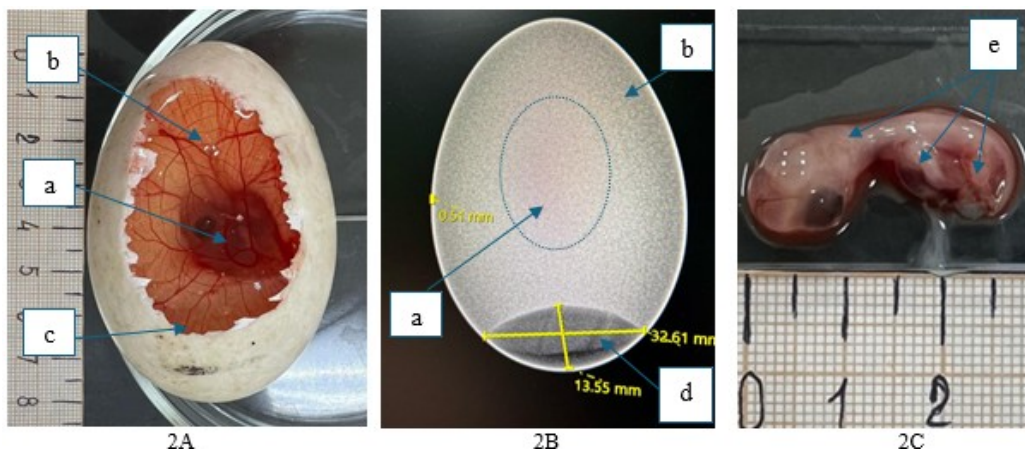


Рисунок 2 (А, В, С) – 8-е сутки – вскрытие, рентген и МРТ утиного яйца: а — эмбрион, b — кровеносные сосуды, с — белок, d — воздушная камера, e — эмбрион с выраженными телесными очертаниями и хрящевыми зачатками конечностей 11-е сутки инкубации.

7-е сутки инкубации. Продолжалось развитие эмбриона и разрастание сосудистой сети, охватывающей желток. Анатомически визуализировались зачатки головы, глаз, клюва и головного мозга. Рент-

генография позволила увидеть формирующиеся конечности и сосудистую сеть.

8-е сутки инкубации. Чётко прослеживалась сформированная сосудистая сеть и дальнейшее удлинение тела эмбриона.

Рентгенография фиксировала развитие хрящевого скелета, а МРТ давала расширенную картину внутренних органов и пространственного расположения тела (Рис. 2 А–С).

На вскрытии отмечались зачатки перьевых фолликулов, удлинение клюва, образование ноздрей и появление "яйцевого зуба". Средняя длина эмбриона составила $48,4 \pm 1,7$ мм. Отмечалось чёткое развитие осевого скелета и черепа (Рис. 3 А–С).

14-е сутки инкубации. Отмечено удлинение клюва и конечностей; началась оссификация хрящевых зачатков. Рентгенография отразила дифференциацию скелет-

ных элементов, а МРТ — внутренние органы (Рис. 4 А–С).

18-е сутки инкубации. Эмбрион занял характерное положение: голова под крылом. МРТ и рентгенография отразили усиление оссификации скелета и изменение пространственного расположения тела (Рис. 5 А–Д).

22-е сутки инкубации. Эмбрион полностью заполнил яйцо, глаза частично открыты, желточный мешок втянут в брюшную полость. МРТ позволила чётко визуализировать голову и внутренние органы (Рис. 6 А–Д).

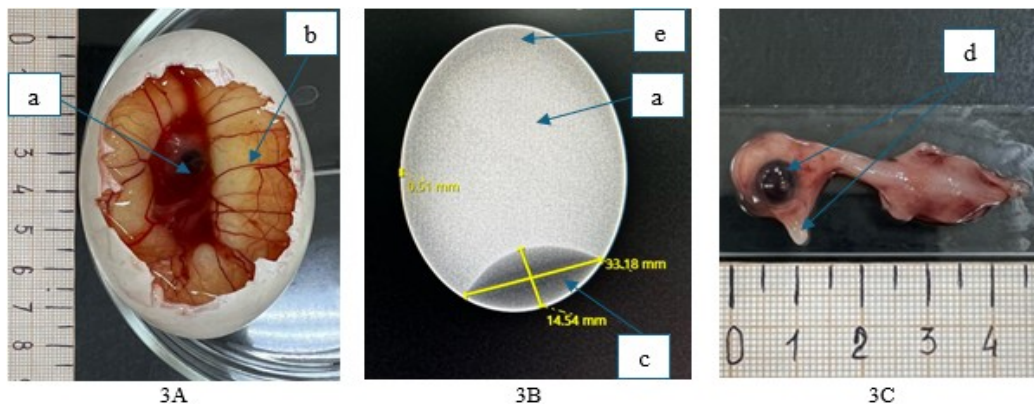


Рисунок 3 (А, В, С) – Изображение препарированного утиного яйца и рентгенограмма на 11-й день инкубации: а – эмбрион, б – кровеносные сосуды, в – воздушная камера, г – эмбрион с удлинённым клювом, сформированными ноздрями, формирующимся «яйцевым зубом» и развивающимся веком на глазном яблоке; д – белок.

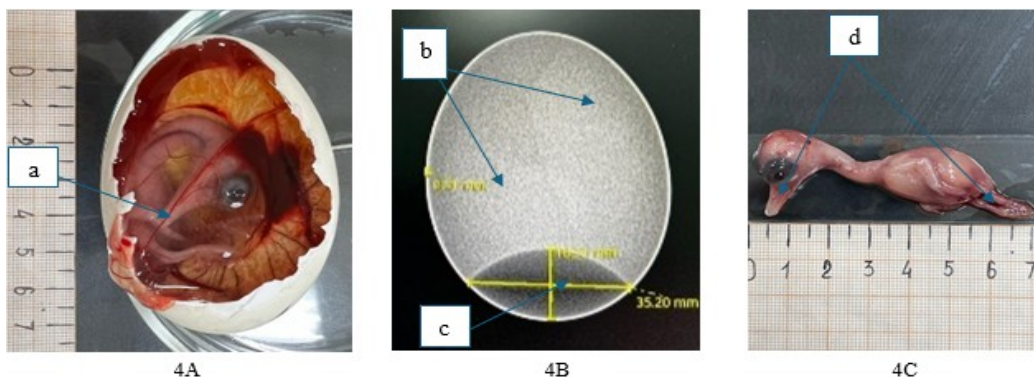


Рисунок 4 (А, В, С) – Изображение препарированного утиного яйца и рентгенограмма на 14-й день инкубации: а – увеличение яйцевого зуба, б – зонирование эмбрионально-аллантоисной оболочки, в – воздушная камера, г – удлинение клюва и конечностей, затвердение хрящевых зачатков.

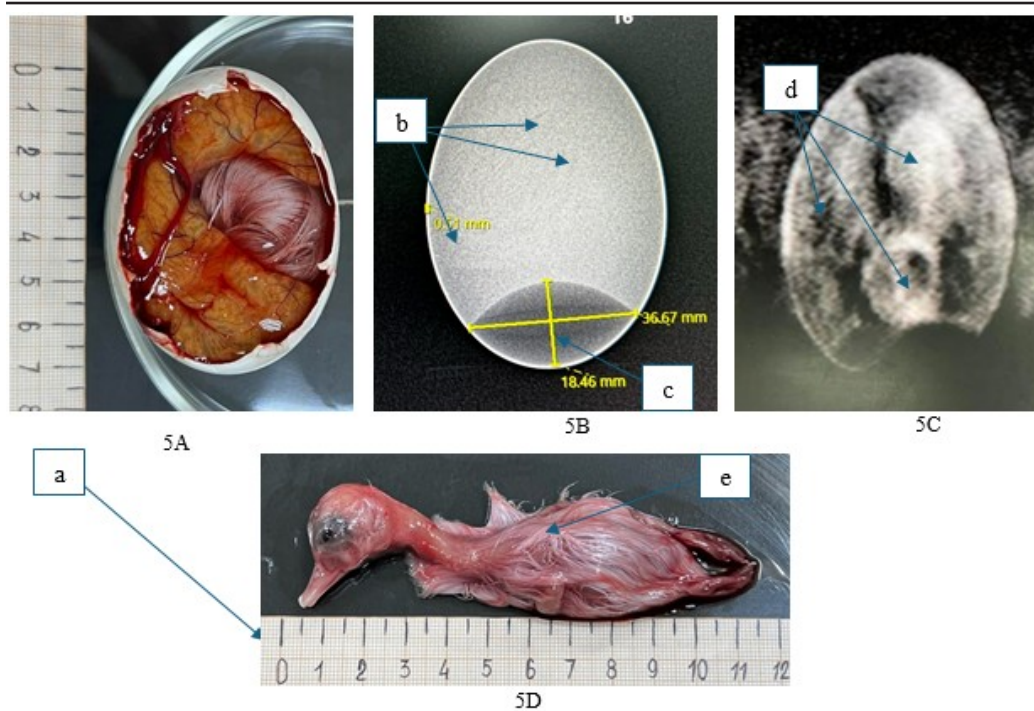


Рисунок 5 (А, В, С, D) – Изображение препарированного утиного яйца, рентгенограмма и МРТ на 18-й день инкубации: а – внешний вид эмбриона в яйце, характерная поза с головой, повернутой под крыло, б – окостенение скелета тела и конечностей, в – воздушная камера, г – разделение на три части: голову, тело эмбриона и аллантоис, д – внешний вид и размеры эмбриона, пух покрывает всё тело.

Значимые этапы эмбрионального развития утят, выявленные в ходе наблюдений, включали формирование кровеносной системы к восьмому дню инкубации, начало оксификации скелета к четырнадцатому дню и появление зачатков перьевого покрова с полностью сформированными когтями к двадцать второму дню. К двадцать шестому дню эмбрион практически полностью занимал внутреннее пространство яйца, процесс абсорбции желточного мешка был почти завершён. На двадцать седьмые сутки фиксировалось начало проклёва скорлупы, что свидетельствовало о готовности организма к вылуплению.

Настоящее исследование представляет собой подробный анализ морфологических и физиологических изменений, происходящих в процессе эмбрионального развития уток, с использованием как

традиционных анатомических методов, так и неинвазивной магнитно-резонансной томографии (МРТ). Полученные результаты подтверждают высокую эффективность МРТ как инструмента для визуализации различных стадий эмбриогенеза у уток, предлагая альтернативу инвазивным методам за счёт сохранения целостности яйца. В данном разделе обсуждаются полученные данные в сопоставлении с результатами предыдущих исследований, с акцентом на преимущества и ограничения применённых методик.

Сравнение МРТ и анатомического вскрытия. Каждый из трёх использованных методов — МРТ, рентгенография и овоскопия — обеспечивал уникальные сведения о развитии утиного эмбриона, при этом эффективность их варьировалась в зависимости от стадии инкубации

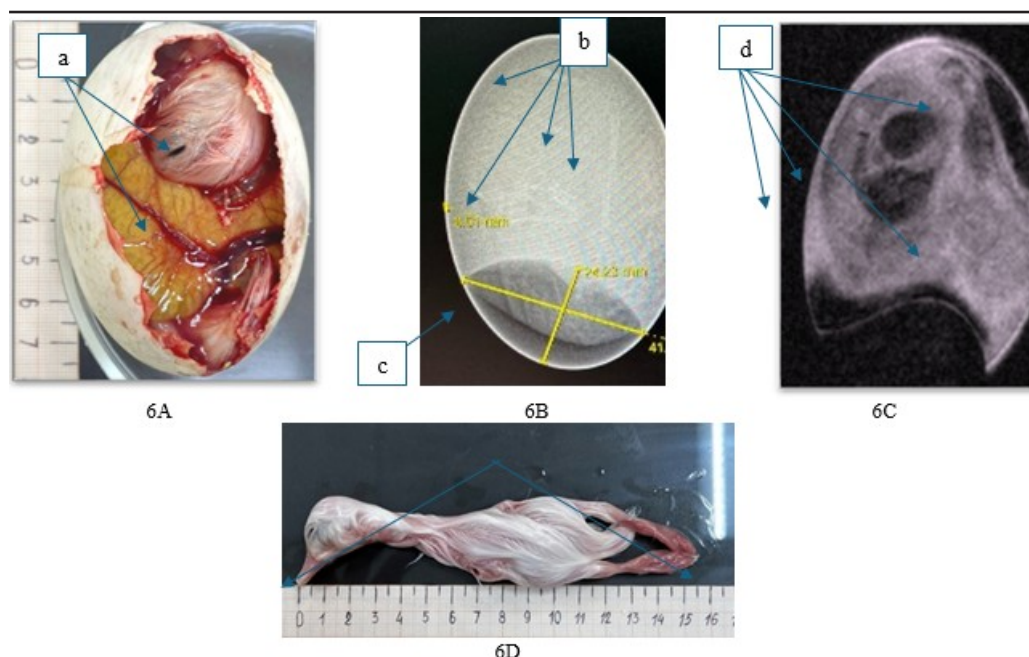


Рисунок 6 (А, В, С, D) – Изображение препарированного утиного яйца, рентгенограмма и МРТ на 22-й день инкубации: а – внешний вид эмбриона в яйце с частично открытым глазом, редуцированным желточным мешком, б – чётко выраженный силуэт головы с глазницами и клювом, трубчатыми костями конечностей и позвоночником, в – воздушная камера, г – голова с клювом и глазницами, шей, телом эмбриона и аллантоисом, д – внешний вид и размеры эмбриона, хорошо сформированные перепонки и ороговевшие когти на нижних конечностях.

и исследуемых структур.

МРТ показала наивысшую информативность в визуализации мягких тканей, включая сердечно-сосудистую систему, внутренние органы и втягивание желточного мешка. Она обеспечила высокое разрешение при непрерывном неинвазивном наблюдении на протяжении всего периода развития. Однако следует отметить высокую стоимость МРТ и ограниченную доступность оборудования, что сдерживает её повсеместное применение.

Рентгенография оказалась особенно полезной для отслеживания процессов оссификации и развития костной системы. Метод позволял чётко визуализировать минеральные структуры, однако был малоэффективен в отношении мягких тканей. Кроме того, необходимо учитывать ограничение по дозовой нагрузке во избежание негативного воздействия на

развивающийся эмбрион.

Овоскопия (просвечивание яйца) являлась наиболее простой и быстрой методикой, обеспечивая оперативную оценку жизнеспособности эмбриона и фиксацию ключевых этапов развития. Однако метод не позволял получить детальную информацию о внутренних структурах и был ограничен по глубине анализа.

Таким образом, сочетание перечисленных методов позволило создать комплексный подход к изучению эмбрионального развития. Овоскопия обеспечивала экспресс-скрининг, тогда как рентген и МРТ позволяли проводить углублённую анатомическую оценку. Наибольший потенциал для неинвазивного мониторинга показала МРТ, однако её практическое применение на рутинной основе ограничивается доступно-

стью и стоимостью оборудования.

Полученные данные демонстрируют высокую степень согласованности между результатами МРТ и анатомических вскрытий. Так, уже на 9-е сутки МРТ позволяла чётко визуализировать основные морфологические структуры эмбриона, включая эмбриональный диск и элементы сердечно-сосудистой системы. Эти наблюдения согласуются с результатами исследований Nogers и соавт. [18, 22], подтвердивших эффективность МРТ для изучения ранних этапов формирования сердечно-сосудистой системы у птиц. Установлено, что МРТ позволяет достоверно фиксировать начальные морфогенетические процессы — формирование желточного мешка и аллантоиса — без нарушения целостности яйца.

К 18-му дню инкубации наблюдалась чёткая дифференцировка структур тела эмбриона. МРТ позволяла получать детальные изображения головы, конечностей и сосудистых образований. Эти данные соотносятся с результатами Li и соавт. [19], применявших МРТ для отслеживания процессов созревания у птичьих эмбрионов. Уникальной особенностью настоящего исследования стало отчётливое визуальное разделение желточного мешка и аллантоиса — элемент, который ранее редко изучался с такой степенью детализации. Это подтверждает возможность замены инвазивных процедур непрерывным мониторингом посредством МРТ.

Оценка поздних стадий эмбрионального развития. Эмбриональное развитие утки в целом соответствует динамике, наблюдаемой у кур, что позволяет проводить сравнительный анализ с данными по другим видам птиц. Однако утиные эмбрионы характеризуются несколько удлинённым инкубационным периодом и иными темпами абсорбции желточного мешка.

На 22-е сутки инкубации отмечено значительное развитие внутренних органов, включая отчётливую визуализацию желудочно-кишечного тракта, печени и структурированной костной системы.

Эти результаты согласуются с данными Effmann и соавт. [20], использовавших МРТ для документирования аналогичных внутренних изменений у птичьих эмбрионов. Настоящее исследование также подтвердило высокую эффективность МРТ в выявлении формирования перьевого покрова и процессов оссификации скелета, что подчёркивает её значимость при наблюдении за поздними стадиями эмбрионального развития. Возможность точной визуализации этих изменений в режиме реального времени делает МРТ ценным инструментом для мониторинга завершающих этапов онтогенеза.

В ходе финальных стадий инкубации (с 24 по 26 сутки) МРТ позволяла отслеживать ряд динамических физиологических процессов, включая всасывание желточного мешка, снижение объёма амниотической жидкости и изменение положения эмбриона. Hatch и соавт. [21] подчёркивали важность применения неинвазивных технологий для наблюдения за изменением пространственной ориентации эмбриона в преддверии вылупления. Настоящее исследование расширяет указанные данные, предоставляя точные изображения положения головы эмбриона в направлении воздушной камеры, что является критически важным этапом подготовки к проклёву. Полученные результаты указывают на превосходство МРТ над традиционными методами при отслеживании тонких морфофункциональных переходов на завершающем этапе развития.

К 26-м суткам МР-сканирование выявило завершающую стадию формирования эмбриона: почти полное всасывание желточного мешка, завершение оссификации скелетных структур, появление ороговения когтей и клюва. Голова эмбриона была ориентирована к воздушной камере, что свидетельствовало о физиологической готовности к вылуплению. Рентгенография подтвердила полную минерализацию костной системы, а овоскопия — минимальные остатки воздушной камеры. В перспективе целесообразно рассмотреть интеграцию МРТ с другими

неинвазивными методами визуализации, такими как компьютерная томография (КТ), для расширения возможностей количественного и пространственного анализа эмбриогенеза. Кроме того, применение МРТ для изучения эмбрионального развития других видов птиц, как предложено в работах Zhou и соавт. [16, 17], может способствовать обобщению полученных данных и углублению понимания видоспецифических особенностей инкубации.

ВЫВОДЫ / CONCLUSION

Проведённое исследование демонстрирует высокую эффективность магнитно-резонансной томографии (МРТ) как неинвазивного метода визуализации эмбрионального развития уток. Применение МРТ позволило получать изображения высокого разрешения в режиме реального времени, обеспечивая детальное наблюдение ключевых стадий развития — от формирования сердечно-сосудистой системы и скелетных структур до органогенеза в период с 3-х до 22-х суток инкубации. Высокая степень согласованности между данными МРТ и результатами традиционных анатомических исследований подтверждает надёжность метода для мониторинга эмбриогенеза без нарушения целостности яйца.

Полученные результаты подчёркивают потенциал МРТ как инструмента оптимизации условий инкубации за счёт получения своевременной информации о состоянии развивающегося эмбриона, что может способствовать улучшению показателей выведения и общих репродуктивных характеристик в птицеводстве. Возможность наблюдения за морфогенезом в режиме реального времени открывает перспективы для раннего выявления отклонений в развитии, оценки воздействия внешних факторов и совершенствования селекционно-племенных программ.

NON-INVASIVE MONITORING OF DUCK EMBRYONIC DEVELOPMENT USING MRI AND COMPARATIVE METHODS

Todoroski K.¹ – PhD in Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Physical Education, Sports and Media Communications (ORCID 0000-0003-4908-4316); **Ezhkova A.M.**² – Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Physiology and Pathological Physiology (ORCID 0000-0002-5526-2214); **Ezhkov V.O.**² – Doctor of Veterinary Sciences, Professor of the Department of Physiology and Pathological Physiology (ORCID 0000-0001-6476-6054)

¹ Moscow City University, Russia

² Kazan State Agrarian University

*kiriltodoroski96@gmail.com

ABSTRACT

Magnetic resonance imaging (MRI) has proven to be a highly effective non-invasive tool for the study of avian embryogenesis, enabling detailed visualization of internal structures without compromising egg integrity. In this study, MRI was combined with conventional approaches, including candling, anatomical dissection, and radiography, to provide a comprehensive evaluation of duck embryonic development. A total of 60 embryos were monitored daily from day 1 to day 27 of incubation, allowing the identification of key stages of growth and structural differentiation. MRI provided high-resolution three-dimensional images of the vascular system, internal organs, and skeletal structures, with particular sensitivity at later developmental stages. Notably, by day 22, the yolk sac began to retract into the abdominal cavity, and by day 27 the embryo reached complete formation and initiated shell pipping. Comparative analysis demonstrated that each method contributed unique information: ovoscopy allowed rapid assessment of embryo viability, radiography provided clear images of skeletal ossification, while MRI offered superior visualization of soft tissues and dynamic processes in real time. The strong concordance between MRI data and anatomical dissection confirmed the reliability of this technique for continuous, non-

destructive monitoring of embryogenesis. The findings highlight the applicability of MRI not only as a fundamental research tool but also as a promising method for optimizing incubation protocols and improving poultry breeding practices. The ability to track organogenesis and morphological changes in vivo provides new opportunities for early detection of developmental abnormalities, assessment of environmental influences, and refinement of incubation management strategies.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тодороски К., Ежкова А.М., Ежков В.О., Волков Р.А. Визуализация и интерпретация эмбрионального развития уток // *International Journal of Veterinary Medicine*. – 2023. – № 1. – С. 212–218. DOI: 10.52419/ISSN2072-2419.2023.1.212.
2. Fares W.A., Ahmed M.R.M., Rizk R.E., Shahein E.H.A., Boutrous N.G., El-Sabrou K. Influence of non-ventilating intervals during early incubation stage on egg hatching process // *Vet World*. – 2023. – Vol. 16, No. 7. – P. 1534–1540. DOI: 10.14202/vetworld.2023.1534-1540.
3. Павлова М.А., Новикова О.Б. Изучение эффективности дезинфицирующего препарата Глудезив для дезинфекции яиц водоплавающей птицы // *Современные аспекты ветеринарной медицины и зоотехнии*. – Пермь: ЦПИ Прокрост, 2018. – С. 117–120.
4. Lumsangkul C., Fan Y.K., Chang S.C., Ju J.C., Chiang H.I. Characterizing early embryonic development of Brown Tsaiya Ducks (*Anas platyrhynchos*) in comparison with Taiwan Country Chicken (*Gallus gallus domesticus*) // *PLoS ONE*. – 2018. – Vol. 13, No. 5. – e0196973. DOI: 10.1371/journal.pone.0196973.
5. Микляева М.А. Стандартные методы изучения раннего онтогенеза у птиц // *Вестник ТГУ*. – 2013. – Т. 18, № 3. – С. 799–802.
6. Щербатов В.И., Яровая Л.Д. Синхронизация вывода цыплят // *Ученые записки КубГАУ*. – 2014. – № 103. – С. 45.
7. Todoroski K., Yezhkova A.M., Yezhkov V.O., Volkov R.A. Visualization, verification, and interpretation of duck embryo development from Day 8 to Day 27. Certificate of Database Registration No. 2022620824. 18 Apr 2022. Application No. 2022620646 from 05 Apr 2022.
8. Borgave S., Ghodke K., Ghaskadbi S. The heart forming region of early chick embryo is an alternative source of embryonic stem cells // *Int J Dev Biol*. – 2009. – Vol. 53, No. 1. – P. 91–99.
9. Aleksandrowicz E., Herr I. Ethical euthanasia and short-term anesthesia of the chick embryo // *ALTEX*. – 2015. – Vol. 32, No. 2. – P. 143–147.
10. Wittig J.G., Münsterberg A. The chicken as a model organism to study heart development // *Cold Spring Harb Perspect Biol*. – 2019. – a037218.
11. Каде А.К., Трофименко А.И., Турова А.Ю. Эмбрион курицы как экспериментальный объект для изучения кардиогенеза // *Медико-биологический вестник им. акад. И.П. Павлова*. – 2018. – Т. 26, № 4.
12. Дьядичкина Л.Ф., Позднякова Н.С., Мелёхина Т.А. и др. Способ хранения инкубационных яиц уток: пат. № 2658845 РФ. Заявл. 06.05.2017; опублик. 25.06.2018. – ФГБНУ «ВНИТИП».
13. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. Методические указания по дезинфекции инкубаторов для птицеводства. – М., 2020.
14. Шагалов В.А., Фахретдинов А.Р., Фатахов Ю.В. Радиоспектрометр для магнитно-резонансного томографа // *Приборы. Техника. Эксперимент*. – 2017. – № 6. – С. 132–133.
15. Bayazitov A.A., Fatakhov Y.V., Fakhretdinov A.R., Shagalov V.A. Receiver sensor for specialized compact magnetic resonance tomograph // *PTE*. – 2020. – No. 6. – P. 89–94.
16. Zhou Z., Chen Z., Shan J., et al. Monitoring brain development of chick embryos in vivo using 3.0 T MRI: subdivision volume change and preliminary structural quantification using DTI // *BMC Dev Biol*. – 2015. – Vol. 15. – P. 29. DOI: 10.1186/s12861-015-0077-6.
17. Zhou J., Liu Y., Zhou S., Chen M., Xiao D. Evaluation of duck egg hatching charac-

teristics with a lightweight multi-target detection method // *Animals*. – 2023. – Vol. 13, No. 7. – P. 1204. DOI: 10.3390/ani13071204.

18. Hogers B. MRI to study embryonic development // *Methods Mol Biol*. – 2011. – Vol. 771. – P. 579–593. DOI: 10.1007/978-1-61779-219-9_30.

19. Li X., Liu J., Davey M., et al. Micro-magnetic resonance imaging of avian embryos // *J Anat*. – 2007. – Vol. 211, No. 6. – P. 798–809. DOI: 10.1111/j.1469-7580.2007.00825.x.

20. Effmann E.L., Johnson G.A., Smith B.R., Talbott G.A., Cofer G. Magnetic resonance microscopy of chick embryos in ovo // *Teratology*. – 1988. – Vol. 38, No. 1. – P. 59–65. DOI: 10.1002/tera.1420380109.

21. Hatch G.M., O'Brien W.T., Wood A.K.W., Ferguson D.J.P. Noninvasive monitoring of chick development in ovo using a 7T MRI system from day 12 of incubation through to hatching // *J Magn Reson Imaging*. – 2007. – Vol. 26, No. 1. – P. 198–201. DOI: 10.1002/jmri.20963.

22. Obara K., Obara C., Naito M., Asano A., Tajima A. Real-time visualisation of developing chick embryos cultured in transparent plastic films from the blastoderm stage until hatching // *Sci Rep*. – 2024. – Vol. 14. – P. 22790. DOI: 10.1038/s41598-024-72004-y.

REFERENCES

1. Todoroski K, Ezhkova AM, Ezhkov VO, Volkov RA. Visualization and interpretation of duck embryo development. *Int J Vet Med*. 2023;1:212-218. doi:10.52419/ISSN2072-2419.2023.1.212.

2. Fares WA, Ahmed MRM, Rizk RE, Shahein EHA, Boutrous NG, El-Sabrout K. Influence of non-ventilating intervals during early incubation stage on egg hatching process. *Vet World*. 2023;16(7):1534-1540. doi:10.14202/vetworld.2023.1534-1540.

3. Pavlova MA, Novikova OB. Studying the effectiveness of the disinfectant preparation Gludeziv for disinfection of waterfowl eggs. In: *Modern aspects of veterinary medicine and zootechnics*. Perm: CPI Prokrost; 2018. p. 117-120.

4. Lumsangkul C, Fan YK, Chang SC, Ju

JC, Chiang HI. Characterizing early embryonic development of Brown Tsaiya Ducks (*Anas platyrhynchos*) in comparison with Taiwan Country Chicken (*Gallus gallus domesticus*). *PLoS ONE*. 2018;13(5):e0196973. doi:10.1371/journal.pone.0196973.

5. Miklyaeva MA. Standard methods for studying early ontogenesis in birds. *Bull TGU*. 2013;18(3):799-802.

6. Shcherbatov VI, Yarovaya LD. Chick hatching synchronization. Scholar: Polythematic Network Electron Sci J Kuban State Agrarian Univ. 2014;103:45.

7. Todoroski K, Yezhkova AM, Yezhkov VO, Volkov RA. Visualization, verification, and interpretation of duck embryo development from Day 8 to Day 27. Certificate of Database Registration. 2022620824. April 18, 2022. Application No. 2022620646 from April 5, 2022.

8. Borgave S, Ghodke K, Ghaskadbi S. The heart forming region of early chick embryo is an alternative source of embryonic stem cells. *Int J Dev Biol*. 2009;53(1):91-99.

9. Aleksandrowicz E, Herr I. Ethical euthanasia and short-term anesthesia of the chick embryo. *ALTEX*. 2015;32(2):143-147.

10. Wittig JG, Münsterberg A. The chicken as a model organism to study heart development. *Cold Spring Harb Perspect Biol*. 2019;a037218.

11. Kade AK, Trofimenko AI, Turova AYU. The chicken embryo as an experimental object for studying cardiovascular development. *Russ Med Biol Bull Named After Academician IP Pavlov*. 2018;26(4).

12. Dyadichkina LF, Pozdnyakova NS, Melekhina TA, et al. Method for storing hatching eggs of ducks. Patent No. 2658845 C1 Russian Federation, IPC A01K 41/00. Appl. 06/05/2017; publ. 06/25/2018. Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research and Technological Institute of Poultry."

13. Russian Federation. Guidelines for the Disinfection of Incubators for Poultry. Ministry of Agriculture. 2020.

14. Shagalov VA, Fakhretudinov AR, Fakhov YV. Radio spectrometer for magnetic resonance tomograph. *PTE*. 2017;6:132-

- 133.
15. Bayazitov AA, Fatakhov YV, Fakhretdinov AR, Shagalov VA. Receiver sensor for specialized compact magnetic resonance tomograph. *PTE*. 2020;6:89-94.
16. Zhou Z, Chen Z, Shan J, et al. Monitoring brain development of chick embryos in vivo using 3.0 T MRI: subdivision volume change and preliminary structural quantification using DTI. *BMC Dev Biol*. 2015;15:29. doi:10.1186/s12861-015-0077-6.
17. Zhou J, Liu Y, Zhou S, Chen M, Xiao D. Evaluation of duck egg hatching characteristics with a lightweight multi-target detection method. *Animals*. 2023;13(7):1204. doi:10.3390/ani13071204.
18. Hogers B. MRI to study embryonic development. *Methods Mol Biol*. 2011;771:579-593. doi:10.1007/978-1-61779-219-9_30.
19. Li X, Liu J, Davey M, et al. Micro-magnetic resonance imaging of avian embryos. *J Anat*. 2007;211(6):798-809. doi:10.1111/j.1469-7580.2007.00825.x.
20. Effmann EL, Johnson GA, Smith BR, Talbott GA, Cofer G. Magnetic resonance microscopy of chick embryos in ovo. *Teratology*. 1988;38(1):59-65. doi:10.1002/tera.1420380109.
21. Hatch GM, O'Brien WT, Wood AKW, Ferguson DJP. Noninvasive monitoring of chick development in ovo using a 7T MRI system from day 12 of incubation through to hatching. *J Magn Reson Imaging*. 2007;26(1):198-201. doi:10.1002/jmri.20963.
22. Obara K, Obara C, Naito M, Asano A, Tajima A. Real-time visualisation of developing chick embryos cultured in transparent plastic films from the blastoderm stage until hatching. *Sci Rep*. 2024;14:22790. doi:10.1038/s41598-024-72004-y.