

Биологические эффекты воздействия ионизирующего и неионизирующего излучения на развитие доимплантационных эмбрионов крупного рогатого скота

В. А. Макутина, Р. А. Вазиров, А. С. Кривоногова, И. М. Донник, А. Г. Исаева[✉],
М. В. Петропавловский

Уральский Федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения
Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

[✉]E-mail: isaeva.05@bk.ru

Аннотация. Целью данного исследования было оценить влияние низких доз ионизирующего (ИИ) и неионизирующего излучения на созревание ооцитов КРС *in vitro* (IVM) и их последующее эмбриональное развитие. **Материалы и методы.** В экспериментальном исследовании яичники КРС первой группы подвергались облучению на ускорителе электронов. Яичники второй группы располагались внутри катушки и подвергались воздействию магнитного поля. После воздействия из яичников получали ооциты и проводили IVM и ЭКО с последующим наблюдением развития эмбрионов в системе *time laps*. Эмбрионы третьей группы находились под воздействием электромагнитного излучения (ЭМИ) маршрутизатора (2,4 ГГц) на протяжении всего периода культивирования эмбрионов от оплодотворения до стадии бластоцисты. **Результаты.** Полученные результаты облучения яичников не позволили достоверно утверждать о наличии негативного эффекта воздействия малых доз ИИ и ЭМИ. Однако в обеих экспериментальных группах ИИ наблюдалась тенденция к снижению уровня сформированных бластоцист по сравнению с контрольной группой. Воздействие магнитного поля на яичники вызывает небольшое, но значимое увеличение сроков первого деления эмбриона. Кроме того, наблюдалась тенденция к уменьшению количества зрелых ооцитов и сформировавшихся бластоцист, что свидетельствует о повышении уровня дегенерации ооцитов и эмбрионов крупного рогатого скота. Прямое воздействие ЭМИ на эмбрионы на предимплантационном этапе не оказывало отрицательного влияния на развитие эмбрионов и не снижало количество бластоцист, образующихся *in vitro*. **Научная новизна.** Впервые проведен сравнительный анализ влияния малых доз ионизирующего излучения на развитие ранних доимплантационных эмбрионов крупного рогатого скота *in vitro*; изучено влияние электромагнитного излучения от техногенных источников на процессы дробления эмбрионов.

Ключевые слова: ооцит крупного рогатого скота, созревание *in vitro*, экстракорпоральное оплодотворение, магнитное поле, электромагнитное излучение

Для цитирования: Макутина В. А., Вазиров Р. А., Кривоногова А. С., Донник И. М., Исаева А. Г., Петропавловский М. В. Биологические эффекты воздействия ионизирующего и неионизирующего излучения на развитие доимплантационных эмбрионов крупного рогатого скота // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 10. С. 1322–1333. DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-10-1322-1333>.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 19-76-10022, <https://rscf.ru/project/19-76-10022>.

Дата поступления статьи: 02.05.2024, **дата рецензирования:** 26.08.2024, **дата принятия:** 18.09.2024.

Biological effects of exposure to ionizing and non-ionizing radiation on the preimplantation bovine embryos development

V. A. Makutina, R. A. Vazirov, A. S. Krivonogova, I. M. Donnik, A. G. Isaeva✉, M. V. Petropavlovskiy

Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

✉E-mail: isaeva.05@bk.ru

Abstract. The purpose of this study was to evaluate the effects of low-dose of ionizing radiation (IR) and non-ionizing radiation on oocyte in vitro maturation (IVM) and subsequent embryonic development. **Materials and methods.** In an experimental study, bovine ovaries of the first group were irradiated with an electron accelerator. The ovaries of the second group were located inside of a coil and were exposed to a magnetic field. After irradiation, oocytes were obtained from the ovaries and IVM and in vitro fertilization (IVF) were performed, followed by observation of embryo development in a time-laps system. The embryos of the third group were exposed to electromagnetic radiation (EMR) from the router (2.4 GHz) throughout the entire period of embryo cultivation from fertilization to blastocyst stage. **Results.** The obtained results of irradiation of the ovaries did not allow us to reliably state if there is a presence of a negative effect of exposure to small doses of irradiation and electromagnetic radiation. However, in both experimental IR groups, there was a decrease in the level of formed blastocysts compared to the control group. The effect of a magnetic field on the ovaries causes a small but significant increase in the timing of the first embryo cleavage. In addition, there was a trend towards a decrease in the number of mature oocytes and formed blastocysts, indicating an increase in the level of degeneration of bovine oocytes and embryos. The direct exposure of preimplantation embryos to EMR did not influence on embryos development and did not reduce the number of blastocysts formed in vitro. **Scientific novelty.** We have carried out a comparative analysis of the influence of low-dose ionizing radiation on the development of pre-implantation bovine embryos in vitro. We have studied the influence of electromagnetic radiation from anthropogenic sources on the embryo cleavage.

Keywords: bovine oocyte, in vitro maturation, in vitro fertilization, magnetic field, electromagnetic radiation

For citation: Makutina V. A., Vazirov R. A., Krivonogova A. S., Donnik I. M., Isaeva A. G., Petropavlovskiy M. V. Biological effects of exposure to ionizing and non-ionizing radiation on the preimplantation bovine embryos development. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24 (10): 1322–1333. DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-10-1322-1333>. (In Russ.)

Acknowledgements. The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation, project No. 19-76-10022, <https://rscf.ru/project/19-76-10022>.

Date of paper submission: 02.05.2024, **date of review:** 26.08.2024, **date of acceptance:** 18.09.2024.

Постановка проблемы (Introduction)

С развитием современных технологий невозможно избежать воздействия неионизирующего излучения и электромагнитных полей (таких как Wi-Fi, микроволновые печи, радио, телекоммуникации, устройства Bluetooth и т. д.) на биологические организмы на разных стадиях развития. Естественный радиационный фон, ЭМИ, механические колебания и другие физические факторы могут оказать как отрицательный, так и положительный эффект на рост и развитие эмбрионов *in vivo* и *in vitro*. ЭМИ классифицируются на ионизирующие и неионизирующие на основании величины энергии, при этом энергия кванта в 10–12 эВ принята критерием разделения, что соответствует длине волны около 100 нм. Ис-

ходя из этого к ионизирующим электромагнитным излучениям относят рентгеновское и гамма-излучение, а к неионизирующим – более низкочастотные: ультрафиолетовое, видимый свет, инфракрасное, микроволновое и радиочастотное.

Влияние ЭМИ может оказать влияние на агропромышленные холдинги, в том числе изменяя репродуктивную функцию сельскохозяйственных животных и воздействуя на эмбриональное развитие. Так, показано, что электромагнитные волны низкой интенсивности от мобильных телефонов повышают уровень смертности на ранних и поздних стадиях развития куриных эмбрионов, способствуют снижению массы тела, длины тела, а также передних и задних конечностей, изменению индек-

са массы тела (ИМТ), массы и диаметра глаз [27], влияют на пролиферацию гепатоцитов куриных эмбрионов [34]. Инкубирование куриных яиц при постоянном воздействии мобильной связи 2G и 4G привело к морфологическим измерениям куриных эмбрионов, в частности, проявлению перекрещенного клюва, не втянутого желточного мешка, макроцефалии, аномалий развития ног и пальцев на ногах, неспособности стоять и сохранять равновесие, а также к изменениям массы тела, длины тела и длины клюва [1]. Также негативное воздействие проявлялось в виде повреждения ДНК в мозге куриных эмбрионов [11]. Показано, что ЭМИ низкой интенсивности оказывает вредное воздействие на ооциты свиней на стадии созревания и последующее эмбриональное развитие [7]. Также в работе [28], с другой стороны, отмечается, что воздействие радиочастотных ЭМИ снижает количество бластомеров и качество эмбрионов, но не оказывает выраженного неблагоприятного воздействия на развитие эмбрионов КРС. Вместе с тем показано, что воздействие электромагнитных полей резко снижает жизнеспособность эмбрионов мужского пола. В то же время имеются данные, позволяющие предположить, что обработка импульсным электромагнитным полем может оказать положительный эффект на способность к развитию эмбрионов [33].

Таким образом, суммируя вышеизложенное, можно подчеркнуть, что изучение влияния ЭМИ на оплодотворение ооцитов и бластуляции является актуальной задачей. Исследования по изучению влияния ЭМИ на ооциты и эмбрионы *in vitro* немногочисленны, но они позволяют расширить понимание механизмов воздействия ЭМИ на эмбрионы.

Известно, что основной мишенью ионизирующего излучения, например, при лучевой терапии является ДНК, которая очень чувствительна к воздействию ИИ [15, 23, 24, 29].

Прямое действие ИИ на молекулу ДНК приводит к ее окислению и образованию разрывов (одноцепочечных и/или двухцепочечных). В случае нарушения работы систем репарации ДНК разрывы в молекуле могут стать причиной мутации и/или структурной перестройки генома – транслокации, потенциально приводя к формированию несбалансированных геномных нарушений, которые вызывают гибель клеток [22]. Косвенное воздействие ИИ генерирует активные формы кислорода, что, в свою очередь, может вызвать повреждение ДНК [22]. Существуют многочисленные подтверждения того, что у женщин, получавших лечение от рака с помощью облучения брюшной полости, таза или всего тела, наблюдаются необратимое повреждение яичников и потеря примордиальных фолликулов, что приводит к нарушению фертильности и преждевременной менопаузе [14; 20]. Непреднамеренное воздействие во время диагностических процедур уже в период бе-

ременности хотя и создает значительное состояние тревоги, но в большинстве случаев не увеличивает естественный риск врожденных аномалий. Фактически большинство диагностических процедур не предполагает воздействия на плод доз более 0,05 Гр, что считается пороговым уровнем риска [32].

В то же время малые дозы ИИ могут оказывать положительные эффекты на биологические объекты [18]. В более ранних работах мы регистрировали стимулирующий эффект на рост и развитие птенцов облученных инкубационных куриных яиц с дозой 40 сГр до закладки в инкубатор [35].

Сообщалось, что магнитные поля промышленной частоты 50–60 Гц влияют на клеточные функции, пролиферацию и апоптоз [6]. Вместе с тем большинство предыдущих исследований не подтвердили наличие выраженных эффектов или токсичности на культурах клеток мышей и человека в условиях переменного магнитного поля с частотой порядка кГц [18; 35], а также на организменном уровне *in vivo* на взрослых особях крыс [26] на показатели репродуктивной функции и параметры сперматогенеза самцов мышей *in vivo* [19] и развитие плода беременных животных 20 кГц (0.2 мТл) и 60 кГц (0.1 мТл) [25].

Влияние низкочастотных ЭМИ на животных или человека на клеточном и организменном уровнях исследуется на протяжении десятилетий. Известно, что индукционные нагреватели и другие подобные технологии являются универсальными источниками ЭМИ в повседневной жизни и опасения по поводу воздействия ЭМИ на здоровье привлекают все больше внимания. Однако имеется мало информации о его влиянии на жизнеспособность эмбриональных клеток и раннее доимплантационное развитие эмбрионов, а механизм возможного воздействия до сих пор не ясен.

Существует множество исследований воздействия различных источников электромагнитного излучения на фертильность и репродуктивную функцию лабораторных животных и человека. S. Dasdag с соавторами показали, что радиочастотный сигнал частотой 2,4 ГГц, излучаемый оборудованием Wi-Fi в течение 12 месяцев, влияет на функцию яичек самцов-крыс и вызывает изменения их гистологической структуры [8]. Согласно данным N. R. Desai с коллегами, радиочастотные волны, воздействуя на ферменты плазматической мембраны сперматозоидов, вызывают выработку свободных форм кислорода в сперме и снижают активность фермента фосфокиназы, таким образом снижая подвижность и выживаемость сперматозоидов [9]. Мета-анализ исследований *in vitro* на людях по качеству спермы, подвергшейся воздействию ЭМИ, выявил связь между воздействием и вариациями конкретных параметров, в частности, жизнеспособности и подвижности сперматозоидов [10], но Научный

комитет по возникающим и вновь выявленным рискам для здоровья (SCENIHR) поставил под сомнение этот вывод на основании дозиметрических недостатков исследований (SCENIHR 2015). Аналогичным образом, в оценке фактических данных о потенциальных последствиях воздействия ЭМИ SCENIHR выразил мнение, что многочисленные доказательства подтверждают отсутствие влияния радиочастотных полей низкой интенсивности на репродукцию или развитие (SCENIHR 2015). В 2020 году ICNIRP в обновлении своих рекомендаций по ограничению воздействия ЭМИ в диапазоне частот 100 кГц – 300 ГГц (ICNIRP 2020) подтвердил отсутствие неблагоприятного воздействия на фертильность, воспроизводство или развитие человека.

В то же время существуют данные о наличии негативного эффекта от воздействия ЭМИ частот от 50 МГц до 2,5 ГГц на гаметы и ранние эмбрионы лабораторных животных *in vitro* [12; 13; 16]. Облучение эмбрионов мышей низкочастотным ЭМИ 50 Гц привело к снижению формирования blastocyst и уменьшению доли выживших эмбрионов [3]. Таким образом, несмотря на количество экспериментов, проведенных с 1970-х годов, разнообразие подходов к испытаниям и условий воздействия, дозиметрические недостатки не позволяют провести надежную оценку воздействия ЭМИ на развитие ранних эмбрионов, что требует более тщательного изучения.

Поскольку яйцеклетки и ранние доимплантационные эмбрионы относительно более чувствительны к ионизирующему и неионизирующему излучению, так как представляют собой эмбриональные стволовые клетки, мы хотели оценить эффекты от воздействия малых доз ионизирующего и неионизирующего излучения на эмбрионы крупного рогатого скота.

Методология и методы исследования (Methods)

Источники ионизирующего излучения и дозиметры

Первую группу яичников КРС облучали на ускорителе электронов URT-0.5 с использованием алюминиевого поглотителя. Таким образом, образцы подвергались воздействию только тормозного излучения с максимальной энергией 500 кэВ. Определение величины поглощенной дозы производили с помощью термолюминесцентных детекторов ТЛД-500 на основе Al_2O_3 . Мощность дозы составила 0,3 сГр/имп (1 импульс – 50 нс, мощность дозы – 1000 Гр/мин). Варьирование поглощенной дозы осуществлялось с помощью увеличения количества импульсов. При проведении эксперимента контрольная группа яичников транспортировалась и находилась в тех же условиях без облучения.

Магнитное излучение

Для оценки воздействия техногенного фактора от магнитного излучения на яичники КРС ис-

пользовали катушку ДК-33 220В, 50 Гц. Измерение параметров магнитного поля производили при помощи датчика Холла. В результате генерировалось магнитное поле с индукцией 2–10 мкТл (в центре соленоида), измеренное датчиком Холла. Схема эксперимента выглядела следующим образом: яичник располагался внутри катушки и подвергался воздействию магнитного поля в течение 1 минуты. Контрольная группа яичников транспортировалась и находилась в тех же условиях без воздействия магнитного поля.

Электромагнитное излучение. Хроническое облучение

Для оценки продолжительного воздействия техногенного фактора от ЭМИ на жизнеспособность эмбрионов КРС использовали маршрутизатор Xiaomi Mi Wi-Fi Router с рабочей частотой 2,4 ГГц (поддержка протокола IEEE 802.11n, максимальная возможная скорость – 300 Мбит/с) и 5 ГГц Wi-Fi 5 ГГц (поддержка протокола IEEE 802.11ac, максимальная возможная скорость – 867 Мбит/с) с 4 внешними всенаправленными антеннами (две антенны 2,4 ГГц с максимальным усилением 5 дБи; две антенны 5 ГГц с максимальным усилением 6 дБи). Измерение ЭМИ производили при помощи детектора RIXET XR-3121 (5 Гц – 3,5 ГГц). До момента включения Wi-Fi оборудования провели измерения уровней ЭМИ. Все параметры ЭМИ были ниже уровня чувствительности прибора и, соответственно, ниже предельно допустимого уровня.

Для проведения эксперимента маршрутизатор помещали внутрь CO_2 -инкубатора для культивирования эмбрионов. Непосредственно над устройством для таймлапс-съемки развития эмбрионов КРС (PrimoVision) располагался маршрутизатор, работающий на частоте 2,4 ГГц и оказывающий воздействие на образцы (рис. 1). Эмбрионы крупного рогатого скота подвергали воздействию ЭМИ с момента оплодотворения до формирования blastocyst (до 8 суток развития). Облучение производили только в режиме 2,4 ГГц. Контрольную группу эмбрионов культивировали в аналогичном CO_2 -инкубаторе в сходных условиях без маршрутизатора. В таблице 1 представлены измеренные показатели полей у контрольной и экспериментальной группы.

Забор ооцитов

Яичники коров отбирали постмортально при убое скота на специализированном убойном пункте и транспортировали в лабораторию с поддержанием температуры +37...+38 °С в течение 3–4 часов после получения. Визуализируемые фолликулы от 2 до 8 мм аспирировали с помощью иглы 18G [1]. При работе с ооцит-кумулятивными комплексами вне инкубатора использовали буферную среду G-MOPS (Vitrolife, Sweden) предварительно нагретую до 38,5 °С.

Таблица 1
Уровни электромагнитного излучения от Wi-Fi-оборудования

Группа	Плотность потока, мкВт/см ²	Электрическое поле, В/м	Магнитное поле, мкТл
Экспериментальная	424–954	40–60	< 0,09
Контрольная	< 1,06	< 2	< 0,09

Table 1
EMR levels of Wi-Fi-router

Group	Flux density, μW/cm ²	Electric field, V/m	Magnetic field, μT
Experimental	424–954	40–60	< 0.09
Control	< 1.06	< 2	< 0.09

Таблица 2
Результаты культивирования эмбрионов КРС после облучения яичников на УРТ-0.5 с поглощенной дозой 10 сГр

Не сформировали бластоцисту	Опыт	Контроль
Длительность первого деления, мин.	68,57 ± 115,81	83,33 ± 103,78
Время второго деления, ч	12,05 ± 4,20	10,21 ± 2,33
Время третьего деления, ч	2,86 ± 2,00	2,04 ± 1,34
Время четвертого деления, ч	14,00 ± 2,78	9,60 ± 1,31
Сформировали бластоцисту	Опыт	Контроль
Длительность первого деления, мин.	30,00 ± 12,91	35,00 ± 21,21
Время второго деления, ч	9,21 ± 0,97	10,35 ± 1,91
Время третьего деления, ч	4,13 ± 2,62	4,35 ± 5,16
Время четвертого деления, ч	7,23 ± 4,39	7,50 ± 4,22
Формирование бластоцисты, ч	156,69 ± 5,45	161,49 ± 14,59
Экспандированная бластоциста, ч	168,06 ± 8,61	174,44 ± 18,76
Процент созревания ооцитов, %	58,1	62,5
Процент формирования бластоцист, %	14,30	33,30
Всего эмбрионов в группе	14	21
Общее количество яичников	10	10

Примечание. Данные представлены как среднее значение ± SE.

Table 2
Results of bovine embryos cultivation after irradiation of the ovaries by URT-0.5 with an absorbed dose of 10 cGy

Embryos that have not formed a blastocyst	Experimental group	Control group
Duration of the first division, min	68.57 ± 115.81	83.33 ± 103.78
from 2 to 3 cells, h	12.05 ± 4.20	10.21 ± 2.33
from 3 to 4 cells, h	2.86 ± 2.00	2.04 ± 1.34
from 4 to 5 cells, h	14.00 ± 2.78	9.60 ± 1.31
Embryos that formed a blastocyst	Experimental group	Control group
Duration of the first division, min	30.00 ± 12.91	35.00 ± 21.21
from 2 to 3 cells, h	9.21 ± 0.97	10.35 ± 1.91
from 3 to 4 cells, h	4.13 ± 2.62	4.35 ± 5.16
from 4 to 5 cells, h	7.23 ± 4.39	7.50 ± 4.22
Blastocyst formation, h	156.69 ± 5.45	161.49 ± 14.59
Expanded blastocyst, h	168.06 ± 8.61	174.44 ± 18.76
Percentage of oocyte maturation, %	58.1	62.5
Percentage of blastocyst formation, %	14.30	33.30
Total count of embryos	14	21
Total count of ovaries	10	10

Note. Data are presented as mean ± SE.

Результаты культивирования эмбрионов КРС после облучения яичников на УРТ-0.5 с поглощенной дозой 25 сГр

Не сформировали бластоцисту	Опыт	Контроль
Длительность первого деления, мин.	40,63 ± 62,23	24,17 ± 11,65
Время второго деления, ч	10,20 ± 3,36	10,43 ± 2,58
Время третьего деления, ч	5,41 ± 4,17	13,05 ± 37,60
Время четвертого деления, ч	19,07 ± 23,64	24,18 ± 19,39
Сформировали бластоцисту	Опыт	Контроль
Длительность первого деления, мин.	24,58 ± 15,16	20,00 ± 14,14
Время второго деления, ч	8,40 ± 0,33	10,05 ± 2,05
Время третьего деления, ч	0,85 ± 0,21	1,05 ± 0,78
Время четвертого деления, ч	21,25 ± 18,74	8,92 ± 2,24
Формирование бластоцисты, ч	149,95 ± 0,38	159,75 ± 10,71
Экспандированная бластоциста, ч	158,83 ± 4,0	177,13 ± 12,34
Процент созревания ооцитов, %	77,8	87,5
Процент формирования бластоцист, %	11,11	24,29
Всего эмбрионов в группе	18	14
Общее количество яичников	11	11

Примечание. Данные представлены как среднее значение ± SE.

Table 3

Results of bovine embryos cultivation after irradiation of the ovaries by URT-0.5 with an absorbed dose of 25 cGy

Embryos that have not formed a blastocyst	Experimental group	Control group
Duration of the first division, min	40.63 ± 62.23	24.17 ± 11.65
from 2 to 3 cells, h	10.20 ± 3.36	10.43 ± 2.58
from 3 to 4 cells, h	5.41 ± 4.17	13.05 ± 37.60
from 4 to 5 cells, h	19.07 ± 23.64	24.18 ± 19.39
Embryos that formed a blastocyst	Experimental group	Control group
Duration of the first division, min	24.58 ± 15.16	20.00 ± 14.14
from 2 to 3 cells, h	8.40 ± 0.33	10.05 ± 2.05
from 3 to 4 cells, h	0.85 ± 0.21	1.05 ± 0.78
from 4 to 5 cells, h	21.25 ± 18.74	8.92 ± 2.24
Blastocyst formation, h	149.95 ± 0.38	159.75 ± 10.71
Expanded blastocyst, h	158.83 ± 4.0	177.13 ± 12.34
Percentage of oocyte maturation, %	77.8	87.5
Percentage of blastocyst formation, %	11.11	24.29
Total count of embryos	18	14
Total count of ovaries	11	11

Note. Data are presented as mean ± SE.

Созревание ооцитов in vitro maturation (IVM)

Применяли специализированную среду промышленного производства для созревания ооцитов крупного рогатого скота (КРС) ВО-IVM (IVF-Bioscience, UK). Среду покрывали минеральным маслом для клеточных культур (Sage, США). Ооцит-кумулосные комплексы помещали в среду созревания на 24–26 часов при уровне углекислого газа 6,5 %, кислороде – 5,0 % при температурном режиме 38,5 °С.

Обработка спермы

Для экстракорпорального оплодотворения использовали криоконсервированные сперматозоиды быка, замороженные в пайетах объемом 0,5 мл. Пайеты размораживали при температуре 37 °С в течение 30 секунд. Обработку сперматозоидов прово-

дили центрифугированием в 3 мл 80-процентного Percoll (Irvine Scientific) в течение 15 минут 400 g при комнатной температуре. Осадок сперматозоидов после центрифугирования промывали буферной средой, содержащей 3 МЕ гепарина в течение 10 минут при 200 g.

In vitro оплодотворение

После центрифугирования и отмывки сперматозоиды в концентрации $1,0\text{--}2,0 \times 10^6$ подвижных сперматозоидов в 1 мл вносили в среду оплодотворения ВО-IVF (IVF-Bioscience, UK) с ооцит-кумулосными комплексами [2]. Инкубировали, покрыв среду минеральным маслом для клеточных культур (Sage), при температурном режиме 38,5 °С, уровне углекислого газа 6,5 об.%, кислорода – 5,0 об.%.

Покадровая съемка и культивирование эмбрионов

Через 16–18 часов ооцит-кумулюсные комплексы очищали от клеток кумулюса и сперматозоидов. Чистку проводили специализированными пипетками для денудирования диаметром 170 мкм Flexipet Denuding Pipette (Cook, Australia). Эмбрионы культивировали в среде VO-IVC (IVF-Bioscience, UK) при температурном режиме 38,5 °С, уровне углекислого газа 6,5 об.%, кислорода – 5,0 об.% под маслом весь период развития до стадии бластоцисты, что составило около 170–180 часов после оплодотворения.

Съемку изображений проводили в системе Primo Vision (Vitrolife, Швеция) [21]. Primo Vision – компактный цифровой инвертированный микроскоп со встроенной оптикой, контрастом Хоффмана и светодиодной подсветкой зеленого цвета (550 нм), помещенный внутрь инкубатора. Культивирование производилось в специальных чашках, вмещающих до 16 эмбрионов. Система производила 1 снимок каждые 10 минут. Все полученные изображения сохраняли для последующего анализа.

Статистическая обработка

Статистическую обработку проводили в программе Statistica 10.0 методами непараметрического анализа с определением достоверности различий по U-критерию Манна – Уитни.

Результаты (Results)

Согласно полученным данным морфо-кинети-ческих параметров развития, не выявлено достоверных отличий по показателям дробления между контрольными эмбрионами и эмбрионами, полученными после воздействия на яичники УРТ-0.5 с поглощенной дозой 10 сГр. Не отмечено отличий в уровне дозревания ооцитов и в эффективности оплодотворения (таблица 2). Однако есть тенденция к снижению количества эмбрионов, достигших стадии бластоцисты после облучения яичников ИИ с поглощенной дозой 10сГц (рис. 1).

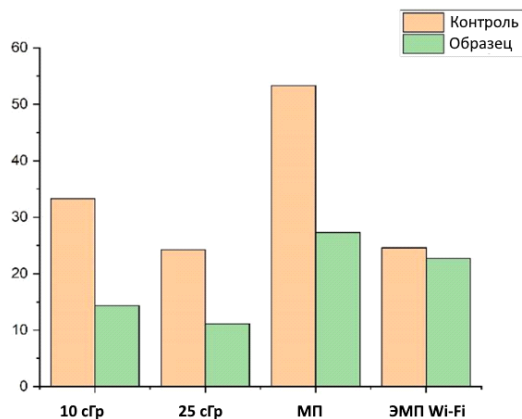


Рис. 1. Влияние облучения проб ИИ (10 и 25 сГр), магнитным полем (МП) и устройствами Wi-Fi 2,4 ГГц (ЭМП Wi-Fi) на уровень формирования бластоцист

Не выявлено достоверных отличий по показателям дробления между контрольными эмбрионами и эмбрионами, полученными после воздействия на яичники УРТ-0.5 с поглощенной дозой 25 сГр. Не отмечено значимых отличий в уровне дозревания ооцитов и в эффективности оплодотворения (таблица 3). Однако есть тенденция к снижению количества эмбрионов, достигших стадии бластоцисты после облучения яичников ИИ с поглощенной дозой 25 сГр (рис. 1).

Согласно полученным данным морфо-кинети-ческих параметров развития, достоверно увеличилась продолжительность цитокинеза в случае воздействия на яичник магнитным полем (таблица 4). Также отмечается явная тенденция к снижению уровня дозрений ооцитов и уменьшению количества эмбрионов, достигших стадии бластоцисты после воздействия на яичники магнитным полем (рис. 1).

Выявлено незначительное укорочение времени между вторым и третьим делениями эмбриона (от стадии трех клеток до стадии четырех клеток). Не отмечено разницы по уровню формирования бластоцист между группами при продолжительном воздействии ЭМИ весь период культивирования эмбрионов in vitro (таблица 5).

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Ионизирующее излучение

В нашей работе мы проводили облучение яичников КРС двумя дозами: 10 сГр и 25 сГр. Мы не обнаружили различий в уровне созревания ооцитов между группами. Созревание ооцита заключается в возобновлении процесса мейоза от диплотены профазы I к метафазе II – стадии, когда ооцит приобретает способность к оплодотворению. Результаты нашего исследования показали, что сопоставимые с контрольными уровни созревания ооцитов выявлены в обеих протестированных дозах ИИ. Однако это не означает высокую компетентность ооцитов к дальнейшему оплодотворению и дроблению и отсутствие повреждений ДНК.

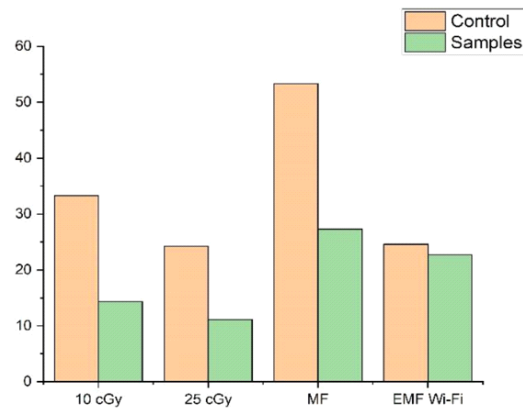


Fig. 1. The effects of irradiation samples by IR (10 and 25 cGy), magnetic field (MF) and Wi-Fi devices 2.4 GHz (EMF Wi-Fi) on the level of blastocyst formation

Результаты культивирования эмбрионов КРС после облучения яичников магнитным полем от катушки

Не сформировали бластоцисту	Опыт	Контроль
Длительность первого деления, мин.	50,00 ± 85,02	178,57 ± 209,58
Время второго деления, ч	12,39 ± 4,75	10,24 ± 4,75
Время третьего деления, ч	2,10 ± 3,12	2,08 ± 2,06
Время четвертого деления, ч	7,67 ± 2,88	8,67 ± 2,31
Сформировали бластоцисту	Опыт	Контроль
Длительность первого деления, мин.	30,00 * ± 10,91	17,50 ± 4,63
Время второго деления, ч	10,06 ± 2,31	8,54 ± 2,63
Время третьего деления, ч	3,06 ± 4,28	1,58 ± 1,83
Время четвертого деления, ч	11,09 ± 2,01	7,67 ± 1,87
Формирование бластоцисты, ч	160,91 ± 5,34	161,07 ± 7,41
Экспандированная бластоциста, ч	166,87 ± 4,44	170,44 ± 8,52
Процент созревания ооцитов, %	56,7	84,6
Процент формирования бластоцист, %	27,27	53,33
Всего эмбрионов в группе	11	15
Общее количество яичников	10	10

Примечание. Данные представлены как среднее значение ± SE.

(*) в одном и том же ряду указывают на значительные различия ($P < 0,05$) между двумя группами.

Table 4

Results of bovine embryos cultivation after irradiation of the ovaries with a magnetic field from a coil

Embryos that have not formed a blastocyst	Experimental group	Control group
Duration of the first division, min	50.00 ± 85.02	178.57 ± 209.58
from 2 to 3 cells, h	12.39 ± 4.75	10.24 ± 4.75
from 3 to 4 cells, h	2.10 ± 3.12	2.08 ± 2.06
from 4 to 5 cells, h	7.67 ± 2.88	8.67 ± 2.31
Embryos that formed a blastocyst	Experimental group	Control group
Duration of the first division, min	30.00 * ± 10.91	17.50 ± 4.63
from 2 to 3 cells, h	10.06 ± 2.31	8.54 ± 2.63
from 3 to 4 cells, h	3.06 ± 4.28	1.58 ± 1.83
from 4 to 5 cells, h	11.09 ± 2.01	7.67 ± 1.87
Blastocyst formation, h	160.91 ± 5.34	161.07 ± 7.41
Expanded blastocyst, h	166.87 ± 4.44	170.44 ± 8.52
Percentage of oocyte maturation, %	56.7	84.6
Percentage of blastocyst formation, %	27.27	53.33
Total count of embryos	11	15
Total count of ovaries	10	10

Note. Data are presented as mean ± SE.

(*) in the same row indicate significant differences ($P < 0.05$) between the two groups.

Наблюдение и покадровая съемка ранних этапов развития эмбрионов КРС осложняются высокой концентрацией липидных гранул в ооцитах и эмбрионах, что затрудняет визуализацию пронуклеусов, оценку оплодотворения и мультинуклеации в видимом спектре. Тем не менее таймлапс-культивирование эмбрионов позволяет получить максимальное количество информации о развитии, в том числе точное время деления и такие морфологические нарушения, которые не наблюдаются при традиционной оценке эмбрионов: реверсивное деление, деление бластомеров более чем на 2 клетки и т. д. Мы не выявили выраженных изменений после облучения ИИ 10 сГр и 25 сГр в морфодинамических показателях дробления эмбрионов КРС, а именно в

скорости делений, уровне фрагментации и вакуолизации. Наши данные позволяют предполагать, что ИИ не влияет на скорость дробления эмбриона, то есть не изменяет длину клеточного цикла.

Однако отмечена явная тенденция к снижению уровня формирования бластоцист во всех группах эмбрионов, полученных после облучения яичников ИИ, что может быть свидетельством нарушений эмбрионального ДНК, приводящих к формированию нежизнеспособных эмбрионов, останавливающихся в развитии на ранних доимплантационных стадиях. Полученные результаты могут являться свидетельством гиперрадиочувствительности ооцитов млекопитающих [4; 18], однако для получения достоверного результата требуются дальнейшие исследования.

Таблица 5

Результаты культивирования эмбрионов КРС при продолжительном воздействии ЭМИ от роутера 2,4 ГГц весь период культивирования (190 часов)

Биология и биотехнологии

Не сформировали бластоцисту	Опыт	Контроль
Длительность первого деления, мин.	50,24 ± 120,01	22,13 ± 23,38
Время второго деления, ч	9,81* ± 3,48	11,90* ± 5,00
Время третьего деления, ч	1,86 ± 2,02	3,55 ± 2,79
Время четвертого деления, ч	9,51 ± 2,79	12,25 ± 11,48
Сформировали бластоцисту	Опыт	Контроль
Длительность первого деления, мин.	26,67 ± 23,48	22,67 ± 34,94
Время второго деления, ч	8,92 ± 1,51	8,70 ± 1,43
Время третьего деления, ч	0,60 ± 0,43	1,76 ± 2,29
Время четвертого деления, ч	9,21 ± 2,43	6,66 ± 3,15
Формирование бластоцисты, ч	165,38 ± 14,48	166,38 ± 11,81
Экспандированная бластоциста, ч	172,60 ± 43,77	178,45 ± 29,63
Процент формирования бластоцист, %	22,72	24,59
Всего эмбрионов в группе	66	61
Общее количество яичников	20	20

Примечание. Данные представлены как среднее значение ± SE.

(* в одном и том же ряду указывают на значительные различия ($P < 0,05$) между двумя группами.

Table 5

Results of bovine embryos cultivation under prolonged exposure to EMR from a 2.4 GHz router for the entire cultivation period (190 hours)

Embryos that have not formed a blastocyst	Experimental group	Control group
Duration of the first division, min	50.24 ± 120.01	22.13 ± 23.38
from 2 to 3 cells, h	9.81* ± 3.48	11.90* ± 5.00
from 3 to 4 cells, h	1.86 ± 2.02	3.55 ± 2.79
from 4 to 5 cells, h	9.51 ± 2.79	12.25 ± 11.48
Embryos that formed a blastocyst	Experimental group	Control group
Duration of the first division, min	26.67 ± 23.48	22.67 ± 34.94
from 2 to 3 cells, h	8.92 ± 1.51	8.70 ± 1.43
from 3 to 4 cells, h	0.60 ± 0.43	1.76 ± 2.29
from 4 to 5 cells, h	9.21 ± 2.43	6.66 ± 3.15
Blastocyst formation, h	165.38 ± 14.48	166.38 ± 11.81
Expanded blastocyst, h	172.60 ± 43.77	178.45 ± 29.63
Percentage of blastocyst formation, %	22.72	24.59
Total count of embryos	66	61
Total count of ovaries	20	20

Note. Data are presented as mean ± SE.

(* in the same row indicate significant differences ($P < 0.05$) between the two groups.

Магнитное излучение

Мы исследовали чувствительность яичников КРС к низкочастотным магнитным полям. Обнаружили, что воздействие магнитного поля на яичники вызывает небольшое, но значимое ($P < 0,05$) увеличение длительности деления эмбриона: от момента появления борозды дробления до формирования двухклеточного эмбриона. Кроме того, отмечена тенденция к снижению уровней созревания ооцитов и формирования бластоцист, что свидетельствует об увеличении показателя дегенерации ооцитов и эмбрионов КРС. Наши данные согласуются с результатами, обнаруженными на мышиных эмбрионах, полученных методом ЭКО, после воздействия магнитным полем [3]. Авторы также сообщили о снижении уровня формирования бластоцист и снижении выживаемости эмбрионов и предположили, что именно эмбрионы после ЭКО наиболее чувствительны к воздействиям магнитного поля на самых ранних стадиях развития [3].

Неионизирующее электромагнитное излучение

Согласно полученным нами данным, ЭМИ, воздействующее весь период культивирования *in vitro* от момента оплодотворения до стадии бластоцисты, не оказывало значимого влияния на морфокинетические показатели дробления эмбрионов КРС. Продолжительность клеточных циклов и образование бластоцист не изменились по сравнению с контрольной группой. Стоит отметить, что немногие исследования были сосредоточены на влиянии ЭМИ на ранние доимплантационные эмбрионы при ЭКО. В то же время, учитывая активное развитие технологий *in vitro* fertilization как у человека, так и у сельскохозяйственных животных, вопрос воздействия ЭМИ на эмбриональные клетки вне организма матери, безусловно, представляет интерес.

Есть данные, что ЭМИ 50 Гц 3 мТл оказывает вредный эффект на репродуктивную систему взрослых самок крыс, на часть фолликулов и клетки гранулезы, а именно приводит к увеличению

уровня дегенерации ооцитов и гранулезных клеток *in vivo* [30]. Анализ с помощью трансмиссионной электронной микроскопии гранулезных клеток самок крыс после воздействия ЭМИ показал увеличение количества макрофагов и вакуолей в клетках гранулезы [31]. Можно предполагать, что ЭМИ при воздействии на взрослых самок ускоряет процесс апоптоза в яичниках. Сообщалось также о влиянии ЭМИ на уровень имплантации и развитие плода. Так, во время спаривания с самками мышей, подвергавшихся воздействию частоты 50 Гц и интенсивности 0,5 мТл в течение 4 часов в день на протяжении двух недель, наблюдалось значительное снижение количества бластоцист и увеличение фрагментации ДНК [5]. Это исследование показало, что воздействие ЭМИ на организм самки может оказывать пагубное воздействие на развитие эмбрионов *in vivo*. Поэтому особый интерес изучения представляют эффекты, наблюдаемые от других техногенных источников ЭМИ с частотами выше 50 Гц, воздействующие на ранние эмбрионы *in vitro* вне организма самки.

Наши результаты показывают, что прямое воздействие ЭМИ от маршрутизатора 2,4 ГГц на эмбрионы предимплантационной стадии не оказывает пагубного эффекта на развитие эмбрионов и не снижает количество бластоцист, формирующихся *in vitro*.

Об авторах:

Валерия Андреевна Макутина, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0003-1127-2792, AuthorID 612436. *E-mail: makutina_v@rambler.ru*

Руслан Альбертович Вазиров, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0001-5392-0386, AuthorID 1035759

Анна Сергеевна Кривоногова, доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0003-1918-3030, AuthorID 683239. *E-mail: tel-89826512934@yandex.ru*

Ирина Михайловна Донник, доктор биологических наук, профессор, академик РАН, главный научный сотрудник, Федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0001-8349-3004, AuthorID 31378.

E-mail: ktqrjp7@yandex.ru

Альбина Геннадьевна Исаева, доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0001-8395-1247, AuthorID 665717. *E-mail: isaeva.05@bk.ru*

Максим Валерьевич Петропавловский, доктор ветеринарных наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0002-9892-6092, AuthorID 676746. *E-mail: petropavlovsky_m@mail.ru*

References

1. Augustianath T., Evans D. A., Anisha G. S. Teratogenic effects of radiofrequency electromagnetic radiation on the embryonic development of chick: A study on morphology and hatchability. *Research in Veterinary Science*. 2023; 159: 93–100. DOI: 10.1016/j.rvsc.2023.04.015.
2. Barkova A. S., Makutina V. A., Modorov M. V., Isaeva A. G., Krivonogova A. S. Features of the preparation of biological material for genome editing in cattle. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2019; 12 (191): 40–44. DOI: 10.32417/1997-4868-2019-191-12-40-4.

3. Beraldi R., Sciamanna I., Mangiacasale R., Lorenzini R., Spadafora C. Mouse early embryos obtained by natural breeding or in vitro fertilization display a differential sensitivity to extremely low-frequency electromagnetic fields. *Mutation Research – Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. 2003; 538 (1-2): 63–70.
4. Bodgi L., Foray N. The nucleo-shuttling of the ATM protein as a basis for a novel theory of radiation response: Resolution of the linear-quadratic model. *International Journal of Radiation Biology*. 2016; 92 (3): 117–131.
5. Borhani N., Rajaei F., Salehi Z., Javadi A. Analysis of DNA fragmentation in mouse embryos exposed to an extremely low-frequency electromagnetic field. *Electromagnetic Biology and Medicine*. 2011; 30 (4): 246–252.
6. Chen Y., Hong L., Zeng Y., Shen Y., Zeng Q. Power frequency magnetic fields induced reactive oxygen species-related autophagy in mouse embryonic fibroblasts. *The International Journal of Biochemistry and Cell Biology*. 2014; 57: 108–114. DOI: 10.1016/j.biocel.2014.10.013.
7. Chen J. S., et al. Effects of electromagnetic waves on oocyte maturation and embryonic development in pigs. *Journal of Reproduction and Development*. 2021; 67 (6): 392–401. DOI: 10.1262/jrd.2021-074.
8. Dasdag S., Taş M., Zulkuf Akdag M., Yegin K. Effect of long-term exposure of 2.4 GHz radiofrequency radiation emitted from Wi-Fi equipment on testes functions. *Electromagnetic Biology and Medicine*. 2015; 34: 37–42. DOI: 10.3109/15368378.2013.869752.
9. Desai N. R., Kesari K. K., Agarwal A. Pathophysiology of cell phone radiation: oxidative stress and carcinogenesis with focus on male reproductive system. *Reproductive Biology and Endocrinology*. 2009; 7 (114): 1–9. DOI: 10.1186/1477-7827-7-114.
10. Dama M. S., Bhat M. N. Mobile phones affect multiple sperm quality traits: a meta-analysis. *F1000Research*. 2013; 2: 40. DOI: 10.12688/f1000research.2-40.v1.
11. D’Silva M. H., et al. Assessment of DNA Damage in Chick Embryo Brains Exposed to 2G and 3G Cell Phone Radiation using Alkaline Comet Assay Technique. *Journal of Clinical & Diagnostic Research*. 2021; 15; 1. DOI: 10.7860/JCDR/2021/47115.14441.
12. Cameron I. L., Hardman W. E., Wendell D. W., Zimmerman S., Zimmerman A. M. Environmental magnetic fields: Influences on early embryogenesis. *Journal of Cellular Biochemistry*. 1993. DOI: 10.1002/jcb.2400510406.
13. Gamze A., Ömür G. D., Kıymet K. Y., Devra D., Süleyman K. Effects of mobile phone exposure on metabolomics in the male and female reproductive systems. *Environmental Research*. 2018; 167: 700–707. DOI: 10.1016/j.envres.2018.02.031.
14. Hessels A. C., Langendijk J. A., Gawryszuk A., Heersters M. A. A. M., van der Salm N. L. M., Tissing W. J. E., van der Weide H. L., Maduro J. H. Review – late toxicity of abdominal and pelvic radiotherapy for childhood cancer. *Radiotherapy and Oncology*. 2022; 170: 27–36. DOI: 10.1016/j.radonc.2022.02.029.
15. Hosseinimehr S. J. The protective effects of trace elements against side effects induced by ionizing radiation. *Radiotherapy and Oncology*. 2015; 33 (2): 66–74.
16. Kocaman A., Altun G., Kaplan A. A., Deniz Ö. G., Yurt K. K., Kaplan S. Genotoxic and carcinogenic effects of non-ionizing electromagnetic fields. *Environmental Research*. 2018; 163: 71–79. DOI: 10.1016/j.envres.2018.01.034.
17. Koyama S., Narita E., Shinohara N., Miyakoshi J. Effect of an intermediate-frequency magnetic field of 23 kHz at 2 mT on chemotaxis and phagocytosis in neutrophil-like differentiated human HL-60 cells. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2014; 11: 9649–9659.
18. Baatout S. (ed.). *Radiobiology: textbook*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2023. 667 p. DOI: 10.1007/978-3-031-18810-7.
19. Kumari K., Capstick M., Cassara A.M., Herrala M., Koivisto H., Naarala J., Tanila H., Viluksela M., Juutilainen J. Effects of intermediate frequency magnetic fields on male fertility indicators in mice. *Environmental Research*. 2017; 157: 64–70. DOI: 10.1016/j.envres.2017.05.014.
20. Levine J. M., Whitton J. A., Ginsberg J. P., Green D. M., Leisenring W. M., Stovall M., Robison L. L., Armstrong G. T., Sklar C. A. Nonsurgical premature menopause and reproductive implications in survivors of childhood cancer: a report from the childhood cancer survivor study. *Cancer*. 2018; 124 (5): 1044–1052. DOI: 10.1002/cncr.31121.
21. Makutina V. A., Krivonogova A. S., Isaeva A. G., Moiseeva K. V., Petropavlovsky M. V. Morphokinetic development parameters of cattle pre-implantation embryos in vitro. *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies (ITJEMAST)*. 2022; 13 (6): 1–9. DOI: 10.14456/ITJEMAST.2022.111.
22. Mavragani I. V., Nikitaki Z., Kalospyros S. A., Georgakilas A. G. Ionizing radiation and complex DNA damage: from prediction to detection challenges and biological significance. *Cancers*. 2019; 11 (11): 1789. DOI: 10.3390/cancers11111789.

23. Mladenova V., Mladenov E., Stuschke M., Iliakis G. DNA Damage Clustering after Ionizing Radiation and Consequences in the Processing of Chromatin Breaks. *Molecules*. 2022; 27 (5): 1540. DOI: 10.3390/molecules27051540.
24. Meador J. A., Morris R. J., Balajee A. S. Ionizing Radiation-Induced DNA Damage Response in Primary Melanocytes and Keratinocytes of Human Skin. *Cytogenetic and Genome Research*. 2022; 162 (4): 188–200. DOI: 10.1159/000527037.
25. Nishimura I., Oshima A., Shibuya K., Negishi T. Lack of teratological effects in rats exposed to 20 or 60 kHz magnetic fields. *Birth Defects Research Part B – Developmental and Reproductive Toxicology Overview*. 2011; 92: 469–477.
26. Nishimura I., Oshima A., Shibuya K., Mitani T., Negishi T. Acute and subchronic toxicity of 20 kHz and 60 kHz magnetic fields in rats. *Journal of Applied Toxicology*. 2016; 36: 199–210.
27. Omar Azzouz S., et al. Morphological changes in chick embryos development exposed to electromagnetic radiation emitted by smart mobile phones. *Advanced Materials Letters*. 2020; 11. 5: 1–8. DOI: 10.5185/amlett.2020.051510.
28. Önal A. G., Güzey Y. Z. Effects of exposure to 2G/3G cell phone radiation on in vitro fertilization, subsequent development and sex distribution of bovine embryos. *Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*. 2023; 28. 2: 427–437. DOI: 10.37908/mkutbd.1205044.
29. Park J. I., Jung S. Y., Song K. H., Lee D. H., Ahn J., Hwang S. G., Jung I. S., Lim D. S., Song J. Y. Predictive DNA damage signaling for low-dose ionizing radiation. *International Journal of Molecular Medicine*. 2024; 53 (6): 56. DOI: 10.3892/ijmm.2024.5380.
30. Roshangar L., Hamdi B. A., Khaki A. A., Soleimani R. J., Soleimani Rad S. Effect of low-frequency electromagnetic field exposure on oocyte differentiation and follicular development. *Advanced Biomedical Research*. 2014; 3: 76. DOI: 10.4103/2277-9175.125874.
31. Roshangar L., soleimani Rad J. Electron microscopic study of folliculogenesis after electromagnetic field exposure. *Journal of Reproduction and Infertility*. 2004; 5 (4): 299–307.
32. Santis M. D., Gianantonio E. D., Straface G., Cavaliere A. F., Caruso A., Schiavon F., Berletti R., Clementi M. Ionizing radiations in pregnancy and teratogenesis: A review of literature. *Reproductive Toxicology*. 2005; 20 (3): 323–329.
33. Sharma A. K., et al. Exposure to pulsed electromagnetic fields improves the developmental competence and quality of somatic cell nuclear transfer buffalo (*Bubalus bubalis*) embryos produced using fibroblast cells and alters their epigenetic status and gene expression. *Cellular Reprogramming*. 2021; 23. 5: 304–315. DOI: 10.1089/cell.2021.0028.
34. Siddiqi N. A., et al. Mobile Phone Electromagnetic Fields Affected the Hepatocytes in the White Leghorn Chicken Embryo: An Ultra-Structural Study. *Biomedical and Pharmacology Journal*. 2020; 13 (1): 245–252. DOI: 10.13005/bpj/1882.
35. Vazirov R., Sokovnin S., Musihina N., Moiseeva K. Surface irradiation of hatching eggs with nanosecond electron beam before incubation for stimulation. In *International Scientific and Practical Conference “Digital agriculture-development strategy” ISPC*. 2019. Pp. 482–485. DOI: 10.2991/ispc-19.2019.108.

Authors' information:

Valeriya A. Makutina, candidate of biological sciences, senior researcher, Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia;

ORCID 0000-0003-1127-2792, AuthorID 612436. *E-mail: makutina_v@rambler.ru*

Ruslan A. Vazirov, candidate of biological sciences, senior researcher, Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0000-0001-5392-0386, AuthorID 1035759

Anna S. Krivonogova, doctor of biological sciences, associate professor, leading researcher, Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia;

ORCID 0000-0003-1918-3030, AuthorID 683239. *E-mail: tel-89826512934@yandex.ru*

Irina M. Donnik, doctor of biological sciences, professor, academician of the Russian Academy of Sciences, chief researcher, Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0000-0001-8349-3004, AuthorID 31378. *E-mail: ktqrjp7@yandex.ru*

Albina G. Isaeva, doctor of biological sciences, associate professor, leading researcher, Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia;

ORCID 0000-0001-8395-1247, AuthorID 665717. *E-mail: isaeva.05@bk.ru*

Maksim V. Petropavlovskiy, doctor of veterinary sciences, leading researcher, Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia;

ORCID 0000-0002-9892-6092, AuthorID 676746. *E-mail: petropavlovsky_m@mail.ru*