

УДК: 619:612.7:620.3

DOI:10.52419/issn2072-2419.2025.4.317

ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ УСИЛЕНИЯ ОСТЕОГЕНЕЗА У УТОК ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ НАНОЧАСТИЦ БЕНТОНИТА В ПЕРИОД ЭМБРИОГЕНЕЗА

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)

¹ Московский городской педагогический университет

² Казанский государственный аграрный университет

*kiriltodoroski96@gmail.com

Ключевые слова: бентонит, наночастицы, минеральная плотность костной ткани, утки, эмбриогенез, рентгенография.

Key words: bentonite, nanoparticles, bone mineral density, ducks, embryogenesis, radiography

Поступила: 24.08.2025

Принята к публикации: 05.12.2025

Опубликована онлайн: 26.12.2025



РЕФЕРАТ

В работе исследовано влияние наносуспензии модифицированного бентонита Тарн-Варского месторождения (Республика Татарстан) на минеральную плотность костной ткани уток при обработке инкубационных яиц в период эмбриогенеза. Эксперимент проведён на 60 инкубационных яйцах пекинской породы, равномерно распределённых на контрольную и опытную группы; обработку 20% наносуспензией бентонита выполняли на 7-й и 13-й сутки инкубации, что соответствует критическим стадиям закладки и минерализации костной ткани [1]. После вылупления в каждой группе сформировали по 20 утят, для рентгенологического анализа в возрасте 3–6 недель отбирали по 5 особей из каждой группы. Рентгенограммы выполняли в вентродорсальной проекции с последующим цифровым анализом яркости в 256 градациях серого и статистической обработкой данных (t-критерий Стьюдента, $p < 0,05$). Результаты показывают статистически значимое повышение минеральной плотности костной ткани у утят опытной группы во всех изученных анатомических зонах: тела шейного позвонка, диафизов и эпифизов плечевой, локтевой и бедренной костей. Наиболее выраженный эффект отмечен в дистальном эпифизе бедренной кости (увеличение до ~13–28% в разные возрастные интервалы, $p < 0,01$) и в средней части диафиза бедра. Положительная динамика сохранялась на протяжении всего наблюдаемого периода (3–6 недель), что свидетельствует о длительном остеотропном действии нанобентонита. Полученные данные подтверждают высокую биодоступность и потенциал наноформ бентонита для стимуляции остеогенеза и повышения прочности скелета у водоплавающей птицы. Метод обработки инкубационных яиц наносуспензией

бентонита можно рассматривать как перспективный подход для профилактики костных патологий и для дальнейших прикладных исследований в ветеринарной практике.

ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION

Полноценное развитие костной ткани у сельскохозяйственной птицы имеет ключевое значение для обеспечения их продуктивности, двигательной активности и профилактики остеопатий [2]. Минеральная плотность костной ткани (МПКТ) тесно связана с механической прочностью скелета, особенно в условиях интенсивного выращивания уток. Традиционные методы обогащения рационов кальцием не всегда обеспечивают высокую биодоступность элементов на критических стадиях развития, особенно в эмбриогенезе [3]. Современные подходы используют наноматериалы для транскорлупной доставки биоэлементов [4]. Бентонит (природная алюмосиликатная глина) обладает выраженной ионообменной способностью и содержит кремний, кальций, железо и другие жизненно важные микроэлементы, необходимые для остеогенеза [5]. Однако влияние наночастиц бентонита на минеральную плотность костей у сельскохозяйственной птицы в эмбриональный период изучено недостаточно [6]. Минеральная плотность костной ткани (МПКТ) тесно связана с механической прочностью скелета, особенно в условиях интенсивного выращивания уток [2]. Традиционные методы обогащения рационов кальцием не всегда обеспечивают высокую биодоступность элементов на критических стадиях развития [3]. Современные подходы используют наноматериалы для транскорлупной доставки биоэлементов [4].

В связи с чем, целью исследований стало изучение влияния обработки инкубируемых яиц наночастицами бентонита *in ovo* на минеральную плотность костной ткани уток в постнатальном онтогенезе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ / MATERIALS AND METHODS

Исследование проведено на базе лабораторий института «Казанская академия ветеринарной медицины имени Н.Э. Баумана» федерального государственного бюджетного образовательного учрежде-

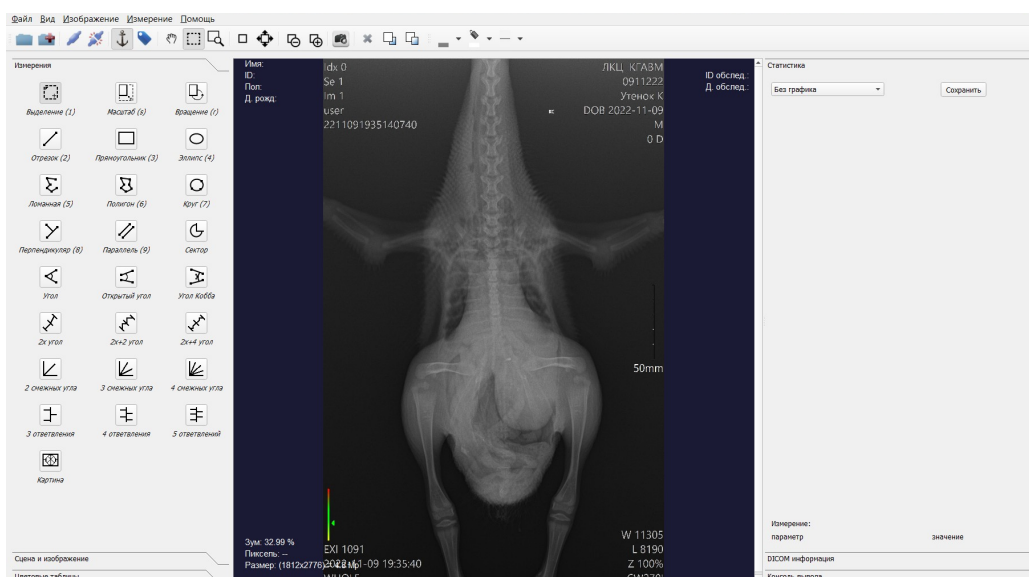
ния высшего образования Казанский государственный аграрный университет. В качестве объекта исследования использовали 60 инкубационных яиц уток пекинской породы, разделенных на контрольную ($n=30$) и опытную ($n=30$) группы.

Для инкубации применяли автоматический бытовой инкубатор «Матрица ВЕ-ГАС» д10 (Россия), предварительно обработанный дезинфицирующим средством. Перед закладкой яйца подвергли овоскопии с использованием настольного овоскопа «ОН-10» (Россия), в результате чего были отбракованы экземпляры с поврежденной скорлупой, неоплодотворенные и некондиционные.

Наносуспension бентонита Тарн-Варского месторождения Республики Татарстан (размер частиц 50-100 нм) изготавливали методом ультразвуковой обработки в аппарате УЗВ 28/200 МПК РЭЛТЭК (Россия) при частоте 18,5 кГц ($\pm 10\%$), мощности 80 Вт и длительности воздействия 20 минут. Концентрация готовой суспензии составила 20% в деионизированной воде. Аттестацию полученного наноструктурного бентонита проводили на сканирующем зондовом микроскопе MultiMode V фирмы Veeco (США) [7]. Обработку яиц опытной группы суспензией нанобентонита проводили пульверизатором на 7 и 13 сутки инкубации, контрольную группу обрабатывали деионизированной водой в аналогичные сроки. Режим инкубации соответствовал принятым стандартам: температура 38,0-37,5°C, влажность 60-90%, с автоматическим поворотом яиц и ежедневным увлажнением в поздние стадии. После вылупления утят были сформированы две группы: опытная и контрольная, по 20 особей в каждой. Для рентгенологического исследования из каждой группы было отобрано по 5 утят. В возрасте уток 3, 4, 5 и 6 недель провели рентгенологические исследования костной ткани с использованием аппарата Dongmun DIG-360 (Корея) и плоскопанельного детектора Rayence 1717 SGC. Съемку выполняли в вентродор-

сальной проекции с параметрами: экспозиция 4 мАс, напряжение 52 кВ. Полученные рентгенограммы анализировали в программе Hi-Scene (Климов и др., 2014), измеряя яркость в 256 градациях серого (рис.1) [8].

Статистическую обработку данных проводили в программе Statistica 12.0 с применением t-критерия Стьюдента; различия считали значимыми при $p < 0,05$. Все этапы работы выполнены в соответствии с этическим кодексом по проведению медико-биологических исследований с использованием животных.



РЕЗУЛЬТАТЫ / RESULTS

Проведенные рентгенологические исследования уток в возрасте трех недель позволили получить следующие результаты (табл. 1).

На 3 неделе постэмбрионального развития в опытной группе, получавшей обработку яиц наносуспезией бентонита, наблюдали статистически значимое увеличение минеральной плотности костной ткани во всех исследуемых областях по сравнению с контрольными аналогами. Наиболее выраженное увеличение на 13,5% ($p < 0,01$) отмечено в области дистального эпифиза бедренной кости и на 6,7% ($p < 0,05$) – в области тела шейного позвонка. Полученные данные свидетельствуют о начале активации процессов минерализации скелета под действием нанобентонита уже в ранний период постнатального онтогенеза.

В возрасте четырех недель сохранялась положительная динамика повыше-

ния показателей минеральной плотности костей у уток опытной группы. Особенно существенное различие наблюдалось в области средней части диафиза бедренной кости – прирост составил 27,8% по сравнению с контролем ($p < 0,01$). Отмечали достоверное увеличение плотности дистального эпифиза бедра опытных уток на 18,1% ($p < 0,01$), увеличение показателя в шейном позвонке на 3,9% ($p < 0,05$) в сравнении с контрольными аналогами, что подтверждает воздействие нанобентонита на развитие процессов остеогенеза (табл. 2).

К пятинедельному возрасту наблюдали дальнейшее увеличение минеральной плотности костной ткани у уток опытной группы. Разница между опытной и контрольной группами продолжает сохраняться и расширяется в большинстве исследуемых областей. Особенно значительные изменения наблюдаются в дистальном эпифизе бедренной кости, увеличение ее

плотности составляет на 13,3% ($p<0,01$), в проксимальном эпифизе локтевой кости на 9,3%, шейного позвонка – на 3,9%, в сравнении с контрольными сверстниками. Полученные данные подтверждают продолжающийся эффект остеогенной стимуляции под влиянием нанобентонита (табл. 3).

К 6 неделе постэмбрионального развития минеральная плотность костной ткани уток опытной группы оставалась выше

по сравнению с контрольными аналогами. Наиболее выраженные различия сохранялись в области бедренной кости: дистальный эпифиз превосходил контрольные значения на 13,5% ($p<0,01$), средняя часть диафиза – на 6,5% ($p<0,05$). Аналогичная тенденция отмечена и в других участках: плотность тела шейного позвонка увеличилась на 6,8%, а в области плечевой и локтевой костей – на 6,3% и 13,6% соответственно (табл. 4).

Таблица 1 – Минеральная плотность костной ткани уток в возрасте 3 недели ($M\pm m$, рх)

Область определения	Контрольная группа (n=5)	Опытная группа (n=5)
Тело шейного позвонка (6 позвонков)	429,90 $\pm$ 14,21	487,34 $\pm$ 7,01
Плечевая кость: диафиз и дистальный эпифиз	228,33 $\pm$ 13,14	255,83 $\pm$ 13,23
Локтевая кость: диафиз и проксимальный эпифиз	235,03 $\pm$ 14,49	256,67 $\pm$ 12,37
Бедренная кость: середина диафизарного участка	222,33 $\pm$ 14,52	231,50 $\pm$ 13,59
Бедренная кость: диафиз и дистальный эпифиз	248,93 $\pm$ 11,34	277,60 $\pm$ 21,67

Таблица 2 – Минеральная плотность костной ткани уток в возрасте 4 недели ($M\pm m$, рх)

Область определения	Контрольная группа (n=5)	Опытная группа (n=5)
Тело шейного позвонка (6)	480,73 $\pm$ 8,41	499,33 $\pm$ 10,75
Плечевая кость: диафиз и дистальный эпифиз	308,13 $\pm$ 2,65	315,47 $\pm$ 16,32
Локтевая кость: диафиз и проксимальный эпифиз	276,60 $\pm$ 7,39	277,20 $\pm$ 9,12
Бедренная кость: середина диафизарного участка	223,66 $\pm$ 8,14	285,80 $\pm$ 5,92
Бедренная кость: диафиз и дистальный эпифиз	262,43 $\pm$ 7,80	309,93 $\pm$ 7,40

Таблица 3 – Минеральная плотность костной ткани уток в возрасте 5 недели ($M\pm m$, рх)

Область определения	Контрольная группа (n=5)	Опытная группа (n=5)
Тело шейного позвонка (6 позвонков)	501,50 $\pm$ 10,66	521,33 $\pm$ 10,27
Плечевая кость: диафиз и дистальный эпифиз	318,83 $\pm$ 14,15	336,10 $\pm$ 14,10
Локтевая кость: диафиз и проксимальный эпифиз	288,90 $\pm$ 20,23	315,86 $\pm$ 7,05
Бедренная кость: середина диафизарного участка	261,63 $\pm$ 2,93	290,26 $\pm$ 10,20
Бедренная кость: диафиз и дистальный эпифиз	300,02 $\pm$ 8,28	339,93 $\pm$ 14,84

Таблица 4 – Минеральная плотность костной ткани уток в возрасте 6 недели (M±m, рх)

Область определения	Контрольная группа (n=5)	Опытная группа (n=5)
Тело шейного позвонка (6)	497,10±8,67	530,67±23,66
Плечевая кость: диафиз и дистальный эпифиз	323,47±3,95	344,07±10,25
Локтевая кость: диафиз и проксимальный эпифиз	292,76±7,80	332,47±8,75
Бедренная кость: середина диафизарного участка	297,03±8,87	316,31±10,10
Бедренная кость: диафиз и дистальный эпифиз	311,10±9,45	353,11±5,41

Результаты исследования свидетельствуют о том, что применение наночастиц бентонита положительно влияет на процессы остеогенеза у сельскохозяйственной птицы, в том числе при воздействии в период эмбрионального развития. Полученные данные согласуются с современными представлениями о высокой биологической активности наноматериалов, способных преодолевать биологические барьеры и оказывать модулирующее воздействие на клеточный метаболизм [4].

В условиях интенсивного птицеводства одной из актуальных проблем остаётся нарушение минерального обмена и, как следствие, развитие остеодистрофий. В этой связи применение биодоступных остеотропных добавок на ранних этапах онтогенеза приобретает особую значимость [2]. Нанобентонит, обладая высокой ионообменной ёмкостью и значительным содержанием кремния, алюминия, кальция и железа, может рассматриваться как перспективный компонент минеральной профилактики [5].

Наблюдавшееся достоверное повышение минеральной плотности костной ткани у уток в опытной группе, особенно в таких областях, как бедренная кость и позвонки, подтверждает остеотропный эффект наночастиц бентонита. Сходные данные были получены в исследованиях на курах мясного направления продуктивности при применении глинистых минералов, таких как бентонит и цеолит [10]. Использование наноформы бентонита обеспечило более выраженный эффект, за

счёт лучшей биодоступности и более активного вовлечения в обменные процессы [11].

Включение наночастиц бентонита в программу эмбрионального воздействия представляется перспективным направлением, так как именно в этот период происходит закладка систем костеобразования. Подобные подходы с использованием наночастиц кальция, фосфора и других микроэлементов ранее успешно апробированы в экспериментах на цыплятах и установлено повышение плотности костной ткани, улучшение морфометрических показателей и повышение сохранности поголовья [4, 6].

ВЫВОДЫ / CONCLUSION

Рентгенологические исследования костной системы уток в динамике показали, что применение наночастиц бентонита в период эмбрионального развития оказывает выраженное положительное влияние на процессы остеогенеза. Проведённый анализ рентгенограмм уток в возрасте 3, 4, 5 и 6 недель выявил устойчивое повышение минеральной плотности костной ткани в различных анатомических зонах у уток опытной группы по сравнению с контролем. Наиболее выраженные изменения наблюдали в бедренной, плечевой костях и шейных позвонках, что указывает на системное действие препарата.

Нанобентонит, благодаря своим ионообменным и остеотропным свойствам, может эффективно использоваться в ветеринарной практике для стимуляции ко-

стеобразования и профилактики остеопатологий у сельскохозяйственной птицы. Введение суспензии бентонита на ранних этапах инкубации, а также возможность дальнейшего применения в кормлении открывают перспективы для его промышленного внедрения в птицеводстве. Полученные результаты позволяют рекомендовать использование нанобентонита как доступного и биологически безопасного средства улучшения минерального обмена и увеличения прочности костной ткани у водоплавающей птицы.

PHYSIOLOGICAL MECHANISMS OF OSTEOGENESIS ENHANCEMENT IN DUCKS UNDER THE INFLUENCE OF BENTONITE NANOPARTICLES DURING EMBRYOGENESIS

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

² Kazan State Agrarian University

*kiriltodoroski96@gmail.com

ABSTRACT

This study investigates the effect of a nanosuspension of modified bentonite from the Tarn-Var deposit (Republic of Tatarstan, Russia) on the bone mineral density of ducks when applied to incubation eggs during embryogenesis. The experiment was conducted on 60 Pekin duck eggs, evenly divided into control and experimental groups. The eggs in the experimental group were treated with a 20% bentonite nanosuspension on the 7th and 13th days of incubation, corresponding to the critical stages of skeletal tissue formation and mineralization [1]. After hatching, 20 ducklings were selected from each group, and radiological analysis was per-

formed on five individuals per group at 3–6 weeks of age. Radiographs were taken in the ventrodorsal projection, followed by digital brightness analysis in 256 grayscale levels and statistical processing of the data (Student's t-test, $p < 0.05$). The results demonstrated a statistically significant increase in bone mineral density in ducklings from the experimental group across all studied anatomical regions, including the cervical vertebral body and the diaphyses and epiphyses of the humerus, ulna, and femur. The most pronounced effect was observed in the distal epiphysis of the femur (an increase of approximately 13–28% across different age intervals, $p < 0.01$) and in the mid-diaphyseal region of the femur. The positive trend persisted throughout the observation period (3–6 weeks), indicating a prolonged osteotropic effect of the nanobentonite. The findings confirm the high bioavailability and potential of bentonite nanostructures for stimulating osteogenesis and improving skeletal strength in waterfowl. The method of treating incubation eggs with a bentonite nanosuspension can be considered a promising approach for preventing bone pathologies and for further applied research in veterinary and poultry science.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тодороски К. Мясная продуктивность и санитарно-гигиеническая оценка качества мяса уток при применении наноструктурного бентонита в кормлении и обработке инкубируемых яиц: дис. ... канд. биол. наук. Москва, 2023. 159 с. EDN LRGYDV.
2. Власенко А.А., Семенов М.П., Кузьмина Е.В. Сравнительный анализ биологических свойств костной ткани цыплят-бройлеров при использовании остеотропных соединений // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2022. № 2(66). С. 306–313. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-02-38.
3. Nadziakiewicz M., Micek P., Wojtysiak D. Effects of dietary halloysite supplementation on broiler chicken's blood parameters, carcass and meat quality, and bone charac-

teristics: a preliminary study // *Annals of Animal Science*. 2023;23(1):129–139. DOI: 10.2478/aoas-2022-0037.

4. Danchuk O., Levchenko A., da Silva Mesquita R., et al. Development of nanomaterials for veterinary medicine (Review) // *Pharmaceutics*. 2023;15(9):2326. DOI: 10.3390/pharmaceutics15092326.

5. Chung Y.H., Choi I.H. Comparison of bentonite and illite on the growth performance and litter quality of duck // *Advances in Animal and Veterinary Sciences*. 2019;7(6):522–525. DOI: 10.17582/journal.aavs/2019/7.6.522.525.

6. Ghazalah A.A., Abd-Elsamee M.O., Moustafa K.E.M.E., Khattab M.A., Rehan A.-E.A.A. Effect of nanosilica and bentonite as mycotoxins adsorbent agent in broiler chickens' diet on growth performance and hepatic histopathology // *Animals*. 2021;11(7):2129. DOI: 10.3390/ani11072129.

7. Ежков В.О., Яппаров А.Х., Неведьев Е.С., Ежкова А.М., Яппаров И.А., Герасимов А.П. Наноструктурные минералы: получение, химический и минеральный составы, структура и физико-химические свойства // *Вестник Казанского технологического университета*. 2014;17(11):41–44.

8. Дьячкова Г.В., Климов О.В., Аранович А.М., Дьячков К.А. Новые возможности изучения дистракционного регенерата по данным рентгенографии // *Гений ортопедии*. 2015;(3).

9. Biesek J., Banaszak M., Adamski M. Ducks' growth, meat quality, bone strength, and jejunum strength depend on zeolite in feed and long-term factors // *Animals*. 2021;11(4):1015. DOI: 10.3390/ani11041015.

10. Matuszewski A., Łukasiewicz M., Niemiec J., Jaworski S., et al. Effect of in ovo application of hydroxyapatite nanoparticles on chicken embryo development, oxidative status and bone characteristics // *Archives of Animal Nutrition*. 2020;74(5):343–361. DOI: 10.1080/1745039X.2020.1803033.

11. Matuszewski A., Łukasiewicz M., Niemiec J., et al. Calcium carbonate nanoparticles – toxicity and effect of in ovo inoculation on chicken embryo development, broiler

performance and bone status // *Animals*. 2021;11(4):932. DOI: 10.3390/ani11040932.

REFERENCES

1. Todoroski K. Meat productivity and sanitary-hygienic assessment of duck meat quality when using nanostructured bentonite in feeding and incubation egg treatment [dissertation for Candidate of Biological Sciences]. Moscow; 2023. 159 p. EDN LRGYDV. (In Russ.)

2. Vlasenko A.A., Semenenko M.P., Kuzminova E.V. Comparative analysis of biophysical properties of broiler chicken bone tissue when using osteotropic compounds. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*. 2022; (2(66)):306–313. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-02-38. (In Russ.)

3. Nadziakiewicz M., Micek P., Wojtysiak D. Effects of dietary halloysite supplementation on broiler chicken's blood parameters, carcass and meat quality, and bone characteristics: a preliminary study. *Ann Anim Sci*. 2023;23(1):129–139. DOI: 10.2478/aoas-2022-0037.

4. Danchuk O., Levchenko A., da Silva Mesquita R., et al. Development of nanomaterials for veterinary medicine (Review). *Pharmaceutics*. 2023;15(9):2326. DOI: 10.3390/pharmaceutics15092326.

5. Chung Y.H., Choi I.H. Comparison of bentonite and illite on the growth performance and litter quality of duck. *Adv Anim Vet Sci*. 2019;7(6):522–525. DOI: 10.17582/journal.aavs/2019/7.6.522.525.

6. Ghazalah A.A., Abd-Elsamee M.O., Moustafa K.E.M.E., Khattab M.A., Rehan A.-E.A.A. Effect of nanosilica and bentonite as mycotoxins adsorbent agent in broiler chickens' diet on growth performance and hepatic histopathology. *Animals*. 2021;11(7):2129. DOI: 10.3390/ani11072129.

7. Ezhkov V.O., Yapparov A.Kh., Nefedyev E.S., Ezhkova A.M., Yapparov I.A., Gerasimov A.P. Nanostructured minerals: production, chemical and mineral composition, structure, and physicochemical properties. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014;17(11):41–44.

(In Russ.)

8. Dyachkova G.V., Klimov O.V., Aronovich A.M., Dyachkov K.A. New opportunities for studying distraction regenerate based on radiographic data. *Geniy ortopedii*. 2015;(3). (In Russ.)

9. Biesek J., Banaszak M., Adamski M. Ducks' growth, meat quality, bone strength, and jejunum strength depend on zeolite in feed and long-term factors. *Animals*. 2021;11(4):1015. DOI: 10.3390/ani11041015.

10. Matuszewski A., Łukasiewicz M., Niemiec J., Jaworski S., et al. Effect of in ovo application of hydroxyapatite nanoparticles on chicken embryo development, oxidative status and bone characteristics. *Arch Anim Nutr*. 2020;74(5):343–361. DOI: 10.1080/1745039X.2020.1803033.

11. Matuszewski A., Łukasiewicz M., Niemiec J., et al. Calcium carbonate nanoparticles – toxicity and effect of in ovo inoculation on chicken embryo development, broiler performance and bone status. *Animals*. 2021;11(4):932. DOI: 10.3390/ani11040932.