

## МОРФОЛОГИЯ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕДРЕННЫХ КОСТЕЙ У САМЦОВ КРЫС РАЗНЫХ ВОЗРАСТОВ

А.О. Федянин<sup>1,2</sup>, М.Э. Балтин<sup>1,2</sup>, Н.Г. Искаков<sup>1,2</sup>, О.В. Герасимов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Поволжский государственный университет физической культуры, спорта и туризма, Казань, Россия;

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия.

### Аннотация

**Цель исследования** – определение морфологических и механических свойств бедренных костей у самцов крыс разных возрастов.

**Материалы и методы исследования.** Трехточечный изгиб и механические испытания на сжатие применялись для макромеханических испытаний. Использовались уравнения  $\text{Напряжение} = \text{Сила} / \text{Площадь поперечного сечения}$  и  $\text{Деформация} = \text{Деформация} / \text{Исходная длина}$  для получения кривой напряжения-деформации. Рассчитывали наклон линейной стадии кривой растяжения.

**Результаты исследования.** Морфологические и механические свойства костей изменяются с возрастом животного. На этапе зрелости скелета микроструктура кости оптимизируется, а после этого этапа микроструктура кости постепенно ухудшается с возрастом. Таким образом, с увеличением возраста животных наблюдается линейная и двухфазная зависимость параметров микроархитектоники бедренной кости.

**Заключение.** Результаты таких исследований помогут лучше понять патогенез остеопороза и других заболеваний костей, а также создать теоретическую базу для клинической диагностики.

**Ключевые слова:** бедренная кость, самцы крыс, возрастные изменения.

## FEMORAL MORPHOLOGY AND MECHANICAL PROPERTIES IN MALE RATS OF DIFFERENT AGES

<sup>1,2</sup>A.O. Fedianin, e-mail: artishock23@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1315-6050

<sup>1,2</sup>M.E. Baltin, e-mail: baban.bog@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5005-1699

<sup>1</sup>N.G. Iskakov, e-mail: NGIskakov@kpfu.ru, ORCID: 0000-0002-3737-9363

<sup>1,2</sup>O.V. Gerasimov, e-mail: OleVGerasimov@kpfu.ru, ORCID:0000-0002-8297-8437

<sup>1</sup>Volga Region State University of Physical Culture, Sports and Tourism, Kazan, Russia

<sup>2</sup>Kazan Federal University, Kazan, Russia

### Abstract

**The purpose of the research** – determination of morphological and mechanical properties of femoral bones in male rats of different ages.

**Materials and methods of research.** Three-point bending and mechanical compression tests were used for micromechanical tests. The equations  $\text{Stress} = \text{Force} / \text{Cross-sectional area}$  and  $\text{Strain} = \text{Strain} / \text{Initial length}$  were used to obtain a stress-strain curve. The slope of the linear stage of the tensile curve was calculated.

**Research results.** The morphological and mechanical properties of bones change with the age of the animal. At the stage of skeletal maturity, the bone microstructure is optimized, and after this stage, the bone microstructure gradually deteriorates with age. Thus, with increasing age of animals, a linear and two-phase dependence of the parameters of the microarchitectonics of the femur is observed.

**Conclusion.** The results obtained will help to better understand the pathogenesis of osteoporosis and other bone diseases, as well as create a theoretical basis for clinical diagnosis.

**Keywords:** femur, male rats, age-related changes.

## ВВЕДЕНИЕ

Старение – естественный процесс, негативно влияющий на целостность костей, что связано с повышенной хрупкостью костей, приводящей к высокому риску перелома бедра даже после минимальной травмы [6,10,8]. Кортикальная область среднего диафиза бедренной кости увеличивается до седьмого десятилетия, однако после достижения этого возраста она начинает уменьшаться как у мужчин, так и у женщин. Также медуллярная площадь у женщин увеличивается втрое, а у мужчин удваивается в возрасте от 21 до 97 лет [9]. Это приводит к снижению минерализации трабекулярной и кортикальной кости и повышает риск переломов. Поэтому очень важно изучать изменения свойств костей с возрастом и связывать их с механическим поведением, чтобы лучше понять этиологию возрастной хрупкости скелета. Посмертные исследования проксимальных отделов бедренной кости у людей показывают, что ухудшение геометрии и микроархитектуры бедренной кости, а также изменения на материальном уровне являются важными возрастными особенностями [4,7]. Качество кости является ключевым компонентом для оценки риска переломов. Сложные особенности, такие как минеральная плотность кости (МПК), механические свойства кости и микроархитектура кости, определяют прочность костей [5]. МПК используется в клиниках для оценки хрупкости костей и риска перелома бедра с возрастом. Однако исследования показали, что МПК не всегда отражает реальное снижение прочности костей у пожилых людей и её возрастное снижение не полностью объясняет повышенный риск перелома бедра при старении [3,1]. Таким образом, целью исследования было определение морфологических и механических свойств бедренных костей у самцов крыс разных возрастов.

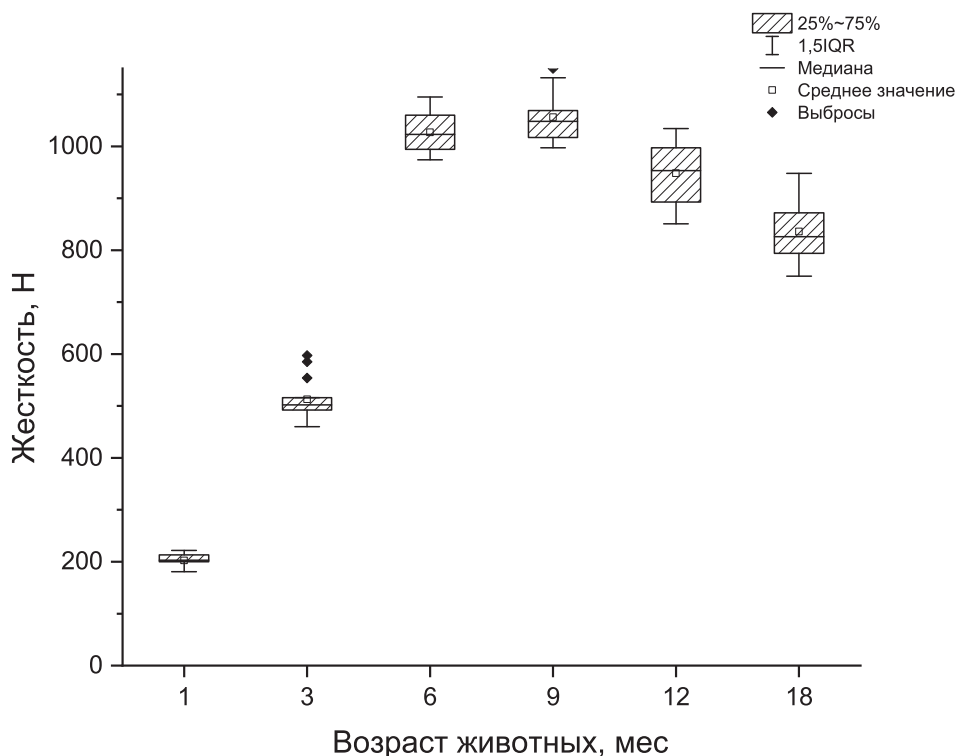
## МЕТОДЫ И ОРГАНИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на нелинейных ла-

бораторных крысах-самцах молодого, среднего и зрелого возрастов. Экспериментальный протокол был одобрен Локальным этическим комитетом Поволжского государственного университета физической культуры, спорта и туризма (Заключение локального этического комитета Поволжского ГУФКСиТ, протокол №2, от 26.05.2023). Содержание, питание и уход за животными осуществлялись согласно международному стандарту. Трехточечный изгиб и механические испытания на сжатие применялись для макромеханических испытаний. Учитывая различия в длине бедренных костей крыс в разные месяцы их жизни в этом исследовании, образцы одинакового размера были вырезаны из бедренных костей для механических испытаний на сжатие [2]. На упругой стадии кривой сила-перемещение для получения кривой напряжения-деформации в программе Origin 8.0 (OriginLab, США) использовались уравнения *Напряжение = Сила / Площадь поперечного сечения* и *Деформация = Деформация / Исходная длина*. Рассчитывали наклон линейной стадии кривой растяжения, который представлял собой модуль макроупругости образца кости. Измеряемыми параметрами были модули упругости (*КПа*) и Жесткости (*Н*).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

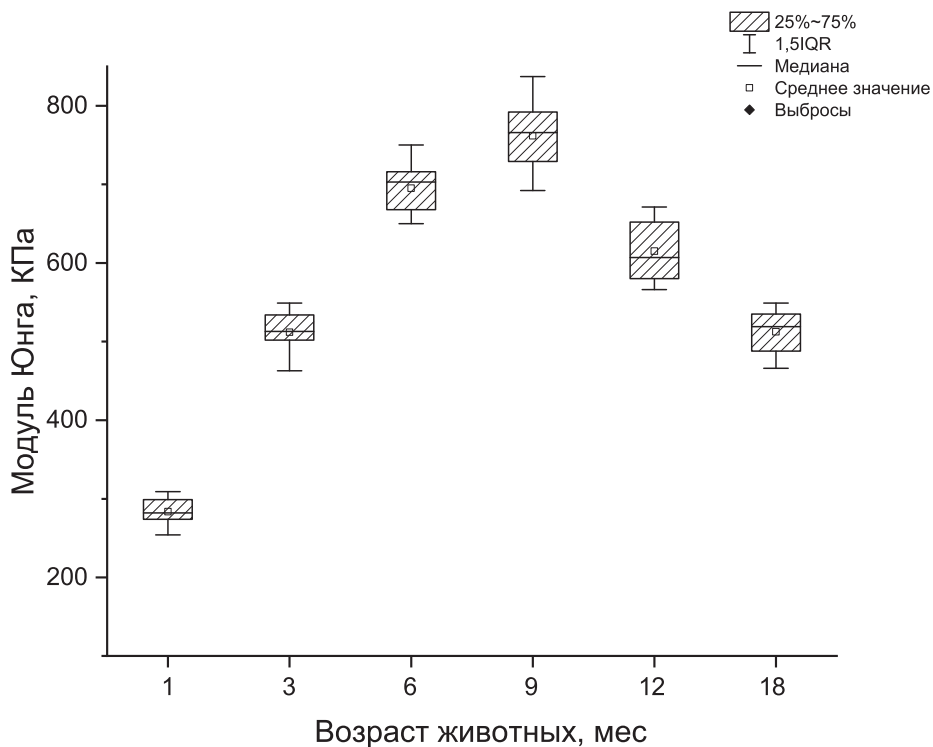
На рисунке 1 показано изменение разрушающей нагрузки кортикальной кости с возрастом животного, которое имело двухфазный характер. В период окостенения скелета (1–7- месячный возраст) нагрузка отказа возрастала линейно на 24,42% в месяц, а корреляция с возрастом животных была значимой ( $p < 0,05$ ). Максимальный пик жесткости достигался к концу зрелого возраста. На втором этапе (9-12 мес.) нагрузка оставалась постоянной. При переходе в зрелый возраст, начиная с 15 месяцев, наблюдалось падение жесткости, что также было значимым в группе ( $p < 0,05$ ).



**Рисунок 1 – Макромеханические параметры кортикальной кости, измеренные с помощью компрессионных тестов на жесткость**  
**Figure 1 – Macromechanical parameters of cortical bone measured using compression stiffness tests**

Модуль упругости кортикальной кости демонстрировал иное двухфазное поведение по сравнению с разрушающей нагрузкой (рисунок 2), который линейно увеличивался на 14,89% в месяц в пер-

вой фазе (1-7- месячный возраст). Также он линейно уменьшался на 7,74% в месяц во второй фазе (9-12-месячный возраст), причем корреляция с возрастом животных также была значимой ( $p < 0,05$ ).



**Рисунок 2 – Макромеханические параметры упругости кортикальной кости, измеренные с помощью модуля Юнга**  
**Figure 2 – Macromechanical elastic parameters of cortical bone measured using Young's modulus**

Результаты исследований показывают, что морфологические и механические свойства костей изменяются с возрастом животного. На этапе зрелости скелета микроструктура кости оптимизируется, а после этого этапа постепенно ухудшается с возрастом. Таким образом, с увеличением возраста животных наблюдается линейная и двухфазная зависимость параметров микроархитектоники бедренной кости. От молодого возраста до стадии зрелости макромеханическая сжимающая нагрузка и/или модуль упругости кортикальной кости улучшаются, но макромеханические параметры кости в процессе старения демонстрируют двухфазный характер. Костные ткани значительно меняются в зависимости от возраста животных из-за процесса ремоделирования кости, который включает резорбцию костной ткани остеокластами и формирование новой кости остеобластами

[10]. Таким образом, понимание возрастных изменений свойств костей на макро- и микроскопическом уровнях имеет важное значение.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании использовались самцы крыс Wistar разных возрастов и изучались возрастные характеристики трабекулярной и кортикальной кости бедренной кости (микроархитектура, механические свойства и минеральный состав) с использованием многоуровневых тестов [11]. Результаты таких исследований помогут лучше понять патогенез остеопороза и других заболеваний костей, а также создать теоретическую базу для клинической диагностики.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Академии наук Республики Татарстан по проекту №23-25-10065.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Cheung, E. A secular increase in BMD in Chinese women / E. Cheung, C. Bow, C. Loong, K.K. Lee, A.Y.Y. Ho // *J Bone Miner Metab.* – 2014. – 32. – P. 48-55.
2. Cory, E. Compressive axial mechanical properties of rat bone as functions of bone volume fraction, apparent density and micro-CT based mineral density, E. Cory, A. Nazarian, V. Entezari, V. Vartanians, R. Muller // *J Biomech.* – 2010. – 43. – P. 953-960.
3. De Laet, C. E. Pols Bone density and risk of hip fracture in men and women: cross sectional analysis / C. E. De Laet, B. A. van Hout, H. Burger, A. Hofman, H. A. // *Br Med J.* – 1997. – 315. – P. 221-225
4. Feik, A. Age-related changes in cortical porosity of the midshaft of the human femur / A. Feik, C. D. Thomas, J. G. Clement // *J Anat.* – 1997. – 191. – P. 407-416.
5. Genant, H. K. Interim report and recommendations of the World Health Organization Task-Force for Osteoporosis / H. K. Genant, C. Cooper, G. Poor, I. Reid, G. Ehrlich // *Osteoporos Int.* – 1999. – 10. – P. 259-264.
6. Johnell, O. Predictive value of BMD for hip and other fractures / O. Johnell, J. A. Kanis, A. Oden, H. Johansson, C. De Laet // *J Bone Miner Res.* – 2005. – 20. – P. 1185-1194.
7. Kapus, O. Relationship between body composition and

bone mineral density of the lumbar spine and proximal femur influence of years since menopause / O. Kapus, A. Gaba, Z. Svoboda, M. Botek // *Mod Rheumatol.* – 2014. – 24. – P. 505-510.

8. Milovanovic, P. Age-related deterioration in trabecular bone mechanical properties at material level: nanoindentation study of the femoral neck in women by using AFM / P. Milovanovic, J. Potocnik, D. Djonic, S. Nikolic, V. Zivkovic // *Exp Gerontol.* – 2012. – 47. – P. 154-159.
9. Overton, T. R. Longitudinal changes in radial bone density in older men / T. R. Overton, T. K. Basu // *Eur J Clin Nutr.* – 1999. – 53. – P. 211-215.
10. Podenphant, J. Christiansen Iliac crest biopsy in longitudinal therapeutic trials of osteoporosis / J. Podenphant, B. J. Riis, J. S. Johansen, A. Leth, C. Christiansen // *Bone Miner.* – 1988. – 5. – P. 77-87.
11. Schneider, D. L. Management of osteoporosis in geriatric populations / D. L. Schneider // *Curr Osteoporos Rep.* – 2008. – 6. – P. 100-107.
12. Whyte, M. P. Teitelbaum Postmenopausal osteoporosis. A heterogeneous disorder as assessed by histomorphometric analysis of Iliac crest bone from untreated patients / M. P. Whyte, M. A. Bergfeld, W. A. Murphy, L. V. Avioli // *Am J Med.* – 1982. – 72. – P. 193-202

## REFERENCES

1. Cheung E, Bow C, Loong C, Lee KK, Ho AYY. A secular increase in BMD in Chinese women. *J Bone Miner Metab.* 2014.on. 32, pp. 48-55.
2. Cory E, Nazarian A, Entezari V, Vartanians V, Muller R. Compressive axial mechanical properties of rat bone as functions of bone volume fraction, apparent density and micro-CT based mineral density. *J Biomech.*, 2010.on. 43, pp. 953-960.
3. De Laet CE, van Hout BA, Burger H, Hofman A, Pols H.A.

Bone density and risk of hip fracture in men and women: cross sectional analysis. *Br Med J.*, 1997.on. 315, pp. 221-225.

4. Feik A, Thomas CD, Clement JG. Age-related changes in cortical porosity of the midshaft of the human femur. *J Anat.*, 1997. on. 191, pp. 407-416.
5. Genant HK, Cooper C, Poor G, Reid I, Ehrlich G. Interim report and recommendations of the World Health Organization Task-Force for Osteoporosis. *Osteoporos Int.*, 1999.on. 10, pp. 259-264.

6. Johnell O, Kanis JA, Oden A, Johansson H, De Laet C. Predictive value of BMD for hip and other fractures. *J Bone Miner Res.*, 2005. on. 20, pp. 1185-1194.
7. Kapus O, Gaba A, Svoboda Z, Botek M. Relationship between body composition and bone mineral density of the lumbar spine and proximal femur influence of years since menopause. *Mod Rheumatol.*, 2014. on. 24, pp. 505-510.
8. Milovanovic P, Potocnik J, Djonic D, Nikolic S, Zivkovic V. Age-related deterioration in trabecular bone mechanical properties at material level: nanoindentation study of the femoral neck in women by using AFM. *Exp Gerontol.*, 2012. on. 47, pp. 154-159.
9. Overton TR, Basu TK. Longitudinal changes in radial bone density in older men. *Eur J Clin Nutr.*, 1999. on. 53, pp. 211-215.
10. Podenphant J, Riis BJ, Johansen JS, Leth A, Christiansen C. Iliac crest biopsy in longitudinal therapeutic trials of osteoporosis. *Bone Miner.*, 1988. on. 5, pp. 77-87.
11. Schneider DL. Management of osteoporosis in geriatric populations. *Curr Osteoporos Rep.*, 2008. on. 6, pp. 100-107.
12. Whyte MP, Bergfeld MA, Murphy WA, Avioli LV, Teitelbaum SL. Postmenopausal osteoporosis. A heterogeneous disorder as assessed by histomorphometric analysis of Iliac crest bone from untreated patients. *Am J Med.*, 1982. on. 72, pp. 193-202.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Федянин Артур Олегович (Fedianin Artur Olegovich) – кандидат биологических наук, младший научный сотрудник лаборатории физиологии спорта; Поволжский государственный университет физической культуры, спорта и туризма, 420010, Россия, Казань, территория Деревни Универсиады, зд. 35; научный сотрудник НИЛ «Механобиология» Казанского федерального университета, Россия, 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 76, корп. 2; e-mail: artishock23@gmail.com; ORCID: 0000-0002-1315-6050

Балтин Максим Эдуардович (Baltin Maxim Eduardovich) – кандидат биологических наук, научный сотрудник НИЛ «Механобиология», Казанский федеральный университет, Россия, 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 76, корп. 2; ведущий специалист лаборатории биомеханики спорта; Поволжский государственный университет физической культуры, спорта и туризма, 420010, Россия, Казань, территория Деревни Универсиады, зд. 35; e-mail: baban.bog@mail.ru; ORCID:0000-0001-5005-1699

Искаков Никита Георгиевич (Iskakov Nikita Georgievich) – кандидат биологических наук, ведущий специалист лаборатории биомеханики спорта; Поволжский государственный университет физической культуры, спорта и туризма, 420010, Россия, Казань, территория Деревни Универсиады, зд. 35; e-mail: NGIskakov@kpfu.ru; ORCID: 0000-0002-3737-9363

Герасимов Олег Владимирович (Gerasimov Oleg Vladimirovich) – ведущий специалист лаборатории биомеханики спорта; Поволжский государственный университет физической культуры, спорта и туризма, 420010, Россия, Казань, территория Деревни Универсиады, зд. 35; научный сотрудник НИЦ НИИММ им. Н.Г. Чеботарева Казанского федерального университета, Россия, 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 76, корп. 2; e-mail: OleVGerasimov@kpfu.ru; ORCID: 0000-0002-8297-8437

Поступила в редакцию 06 мая 2024 г.

Принята к публикации 28 мая 2024 г.

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Федянин, А.О. Морфология и механические свойства бедренных костей у самцов крыс разных возрастов / А.О. Федянин, М.Э. Балтин, Н.Г. Искаков, О.В. Герасимов // Наука и спорт: современные тенденции. – 2024. – Т. 12, № 2 – С. 56-60. DOI: 10.36028/2308-8826-2024-12-2-56-60

#### FOR CITATION

Fedianin A.O., Baltin M.E., Iskakov N.G., Gerasimov O.V. Femoral morphology and mechanical properties in male rats of different ages. *Science and sport: current trends.*, 2024, vol. 12, no. 2. – pp. 56-60. DOI: 10.36028/2308-8826-2024-12-2-56-60