

B. V. Акимова, M. A. Бударина, T. Ю. Нефедова, D. B. Иванов

ОБ ОЦЕНКЕ МЕЖЭКСПЕРТНОЙ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОДНООСНОМУ СЖАТИЮ ОБРАЗЦОВ ГУБЧАТОЙ КОСТИ

*Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского,
Саратов, Россия*

Аннотация. Эффективный модуль упругости представляет собой ключевой параметр, который характеризует жесткость материала и его способность противостоять деформациям. Известно, что модуль упругости кости сильно коррелирует с ее структурными характеристиками, такими как минеральная плотность и пористость. Множество исследовательских групп сосредоточено на изучении упругих свойств губчатой кости с использованием одноосных экспериментов по сжатию. Учитывая сложности, связанные с проведением натурных экспериментов на человеческих костях, исследование механических свойств губчатой кости часто осуществляется на образцах крупного рогатого скота. Следует отметить, что получаемые разными экспертами и научными группами результаты могут значительно варьироваться, что подчеркивает необходимость анализа межэкспертной и межлабораторной надежности таких исследований. В данной работе проведено исследование межэкспертной надежности при вычислении эффективного модуля упругости губчатой кости крупного рогатого скота и при построении регрессионных зависимостей, связывающих его со структурными свойствами. Для этого проведен ряд экспериментов по одноосному сжатию образцов губчатой кости, а также определены объемная, минеральная плотность и пористость исследованных образцов. Вычисление модулей упругости, оценка структурных свойств кости выполнены разными экспертами. В результате анализа результатов нам удалось получить достаточно высокие показатели надежности расчета разными экспертами эффективного модуля упругости костной ткани и построения ими зависимостей данного показателя от структурных свойств кости (пористость, минеральная плотность, объемная плотность).

Ключевые слова: эффективный модуль упругости, пористость кости, минеральная плотность кости, межэкспертная надежность, одноосное сжатие.

Акимова Виктория Владимировна, студентка 3 курса факультета фундаментальной медицины и медицинских технологий; e-mail: viktoriaakimova507@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-1667-1665>

Бударина Мария Алексеевна, студентка 3 курса факультета фундаментальной медицины и медицинских технологий; e-mail: mbudarina058@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-6900-9148>

Нефедова Татьяна Юрьевна, студентка 3 курса факультета фундаментальной медицины и медицинских технологий; e-mail: nefedovaty@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0005-9429-8198>

Иванов Дмитрий Валерьевич, доктор физико-математических наук; ведущий научный сотрудник учебной лаборатории цифровых медицинских технологий; e-mail: ivanovdv.84@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1640-6091>; AuthorID: 201794



для цитирования: Акимова В.В., Бударина М.А., Нефедова Т.Ю., Иванов Д.В. Об оценке межэкспертной надежности при обработке результатов экспериментов по одноосному сжатию образцов губчатой кости // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2025. № 2(64). С. 128–142. DOI: 10.37972/chgri.2025.64.2.008. EDN: FUAKDQ

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

V. V. Akimova, M. A. Budarina, T. Yu. Nefedova, D. V. Ivanov

ON ESTIMATION OF INTER-EXAMINER RELIABILITY IN PROCESSING THE RESULTS OF UNIAXIAL COMPRESSION EXPERIMENTS ON SPONGY BONE SPECIMENS

N.G. Chernyshevsky Saratov State University, Saratov, Russia

Abstract. The effective modulus of elasticity is a key parameter that characterizes the stiffness of a material and its ability to resist deformation. It is known that the modulus of elasticity of bone is strongly correlated with its structural characteristics, such as mineral density and porosity. Many research groups have focused on studying the elastic properties of cancellous bone using uniaxial compression experiments. Given the difficulties associated with conducting in-situ experiments on human bones, studies of the mechanical properties of cancellous bone are often performed on bovine specimens. It should be noted that the results obtained by different experts and scientific groups can vary significantly, which emphasizes the need to analyze the interexpert and interlaboratory reliability of such studies. In this paper, the study of inter-expert reliability in calculating the effective modulus of elasticity of bovine cancellous bone and in constructing regression relationships linking it to structural properties is carried out. For this purpose, a number of experiments on uniaxial compression of spongy bone samples were carried out, and the volume, mineral density and porosity of the studied samples were determined. Calculation of elasticity moduli and assessment of bone structural properties were performed by different experts. As a result of analyzing the results, we were able to obtain sufficiently high reliability values for the calculation of the effective modulus of elasticity of bone tissue by different experts and their construction of dependencies of this index on the structural properties of bone (porosity, mineral density, bulk density).

Keywords: effective elastic modulus, bone porosity, bone mineral density, interexpert reliability, uniaxial compression.

Victoria V. Akimova, 3rd year student of the Faculty of Fundamental Medicine and Medical Technologies; e-mail: viktoriaakimova507@gmail.com;
<https://orcid.org/0009-0008-1667-1665>

Maria A. Budarina, 3rd year student of the Faculty of Fundamental Medicine and Medical Technologies; e-mail: mbudarina058@gmail.com;
<https://orcid.org/0009-0008-6900-9148>

Tatiana Yu. Nefedova, 3rd year student of the Faculty of Fundamental Medicine and Medical Technologies; e-mail: viktoriaakimova507@gmail.com;
<https://orcid.org/0009-0008-1667-1665>

Dmitry V. Ivanov, Leading Researcher at the Educational Laboratory of Digital Medical Technologies; e-mail: ivanovdv.84@ya.ru;
<https://orcid.org/0000-0003-1640-6091>; AuthorID: 201794



to cite this article: Akimova V. V., Budarina M. A., Nefedova T. Yu., Ivanov D. V
On estimation of inter-examiner reliability in processing the results of uniaxial compression experiments on spongy bone specimens // Vestn. Chuvash. Gos.
Ped. Univ. im. I.Ya. Yakovleva Ser.: Mekh. Pred. Sost. 2025. No 2(64). p. 128–142.
DOI: 10.37972/chgpu.2025.64.2.008

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение. Для достижения высокой степени достоверности в компьютерном моделировании реальных биомедицинских процессов крайне важно точно определять физико-механические свойства исследуемых материалов, например, костной ткани [1–4]. Композиционное строение кости обеспечивает ей необходимые механические характеристики, включая твёрдость, упругость и прочность. Механические свойства материала отражают его способность сопротивляться воздействию различных внешних воздействий. Одним из ключевых параметров механических свойств является эффективный модуль упругости, который характеризует жесткость материала и его способность противостоять изменениям формы и размеров. Эффективный модуль упругости костной ткани зависит от ее структурных характеристик, таких как минеральная плотность (МПК) [1, 2, 5]. Исследования показывают, что увеличение МПК приводит к повышению модуля упругости, что делает кость более прочной и менее хрупкой.

Многие научные группы проводят исследования упругих свойств губчатой кости, используя одноосные эксперименты по сжатию [6–9]. Это позволяет получить важные данные о поведении губчатой кости под нагрузкой и способствует лучшему пониманию ее механических свойств. Следует отметить, что расчет эффективного модуля упругости по стержневой теории (при одноосном сжатии) может быть выполнен только для «длинных» образцов, отношение высоты которых к размерам их поперечного сечения должно быть не менее 5 к 1 [6].

Так как натурные эксперименты с человеческими костями затруднены, многие авторы исследуют механические свойства губчатой кости крупного рогатого скота, полагая, что костная ткань животных и человека имеет схожий состав и структуру [10, 11].

Нужно отметить, что при вычислении модуля упругости губчатой костной ткани разными экспертами результаты могут отличаться. Чтобы оценить влияние человеческого фактора на точность вычислений, проводят анализ межэкспертной и межлабораторной надежности. Межэкспертная надежность – это степень согласованности результатов, полученных разными экспертами при анализе одних и тех же данных. А межлабораторная надежность – это степень согласованности результатов, полученных в разных лабораториях при использовании одних и тех же методов. Различия в оборудовании, методах и условиях проведения экспериментов могут привести к вариативности результатов.

Цель работы – оценить межэкспертную надежность при оценке модуля упругости губчатой кости по результатам одноосных экспериментах по сжатию и при получении зависимостей между структурными и механическими свойствами губчатой кости.

1. Материалы и методы.

1.1. Подготовка образцов. Одноосному сжатию подвергали образцы губчатой кости коленного сустава крупного рогатого скота. Возраст животных на момент забоя составлял 18 месяцев. Срок от момента забоя до проведения экспериментальных исследований не превышал суток. Кости коленных суставов приобретались на продовольственном рынке.

Образцы имели форму прямоугольных параллелепипедов и изготавливались с использованием ручной ножовки по металлу. Каждый образец дорабатывали наждачной бумагой для придания правильной формы. Длина и ширина (глубина) образцов варьировались в диапазоне от 5 мм до 7 мм, тогда как высота изменялась в пределах от 35 до 40 мм. Относительная высота, определяемая как отношение высоты образца к среднему значению его ширины и глубины, находилась в диапазоне от 5 до 7 единиц [6]. Измерение геометрических параметров образцов осуществлялось с использованием цифрового штангенциркуля Mitutoyo (точность до 0.01 мм). Перед сжатием каждый образец взвешивался на весах Ohaus ax5202 (точность 0.01 г).

1.2. Оценка механических и структурных свойств кости. Объемная плотность образцов вычислялась по формуле:

$$BVD = \frac{m_{wet}}{V_{wet}}. \quad (1)$$

где m_{wet} – масса образца до сжигания (г), V_{wet} – объем образца до эксперимента (cm^3).

Каждый образец подвергался одноосному сжатию на универсальной испытательной машине Instron 3342, оснащенной нагрузочной ячейкой 500 Н. Процесс сжатия осуществлялся с постоянной скоростью 2 мм/мин при температуре окружающей среды, равной 20°C. Перед началом сжатия каждый образец предварительно нагружался силой величиной 10 Н [9]. Эффективный модуль упругости определялся по линейному участку на диаграмме сжатия (рисунок 1) по формуле

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = t g \alpha \quad (2)$$

где E – эффективный модуль упругости (Па), σ – напряжение (МПа), ϵ – относительная деформация (мм/мм), α – угол наклона касательной к графику зависимости напряжения (σ) от деформации (ϵ) в области упругой деформации.

После сжатия каждый образец сжигался в муфельной печи при температуре 600 градусов Цельсия в течение 3 часов для удаления органических соединений [12]. Далее образцы снова взвешивались и определялась их минеральная плотность по формуле:

$$BMD = \frac{m_{ash}}{V_{wet}}. \quad (3)$$

где m_{ash} – масса образца после сжигания (г), V_{wet} – объем образца до эксперимента (cm^3).

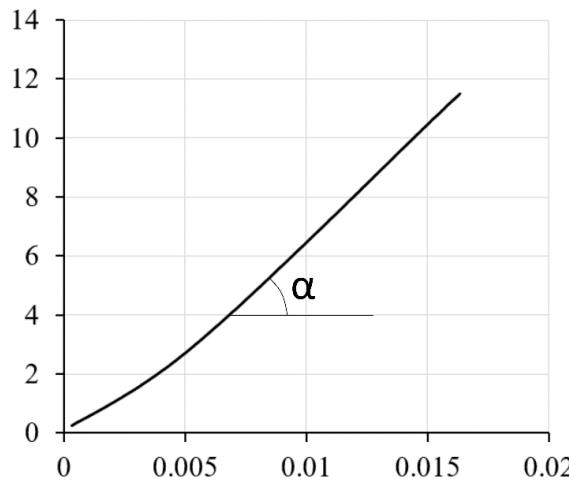


Рис. 1. Типичная диаграмма сжатия: σ – напряжение при сжатии в МПа (по вертикали), ϵ – относительная деформация (по горизонтали)

Для оценки пористости определялся объем пор в образце после сжигания посредством измерения объема вытесняемого им этилового спирта из мерного цилиндра (объемом 5 мл первого класса точности с ценой деления 0.1 мл) [12]. Пористость кости вычислялась по формуле:

$$\eta = \frac{V_p}{V_{wet}}. \quad (4)$$

где V_p – объем пор (cm^3), V_{wet} – объем образца (cm^3).

1.3. План экспериментов. 1 тип экспериментов. Межэкспертное сравнение модулей упругости. Сжатию подвергали 25 образцов. Выполнены построение и сравнительный анализ зависимостей между модулями упругости и пористостью, объемной, а также минеральной плотностью, полученных двумя экспериментами.

2 тип экспериментов. Сравнение модулей упругости при первичном и повторном сжатиях: при первичном сжатии нагружение осуществлялось в рамках линейного участка. Сжатию подвергали 20 образцов. Оценивались различия в модулях упругости при первичном и повторном сжатиях.

3 тип экспериментов. Сравнение модулей упругости свежих и подсушенных образцов. Эксперименты проводились с образцами сразу же после их подготовки и через 7 дней после их подсушивания при комнатной температуре. Сжатию подвергали 16 образцов. Оценивались различия в модулях упругости свежих образцов и после подсушки.

1.4. Статистический анализ.

- (1) Анализ нормальности распределения данных в выборках с использованием теста Шапиро-Уилка. Вычисление описательных статистик.
- (2) Визуализация выборок «диаграммами размаха» в пакете Microsoft Excel.

- (3) Сравнение выборок с использованием критерия Манна-Уитни или дисперсионного анализа (ANOVA) в зависимости от распределения данных в выборках.
- (4) Построение регрессионных зависимостей между эффективными модулями упругости структурными свойствами кости и их сравнение с помощью косинусного сходства.

2. Результаты.

2.1. Оценка межэкспертной надежности при вычислении модуля упругости двумя экспертами. Для оценки межэкспертной надежности проводилось сравнение выборок эффективных модулей упругости, полученных разными экспертами. В связи с тем, что результаты теста Шапиро-Уилка указали на ненормальность распределения, описательные статистики представлены в виде медианы, а также верхнего и нижнего квартилей (таблица 1). Результаты сравнительного анализа межэкспертной надежности иллюстрируются диаграммой, на которой представлены выборки эффективных модулей (рисунок 2).

	Q_1	Ме	Q_3
Эксперт 1	397.66	538.63	704.73
Эксперт 2	387.48	517.63	712.88

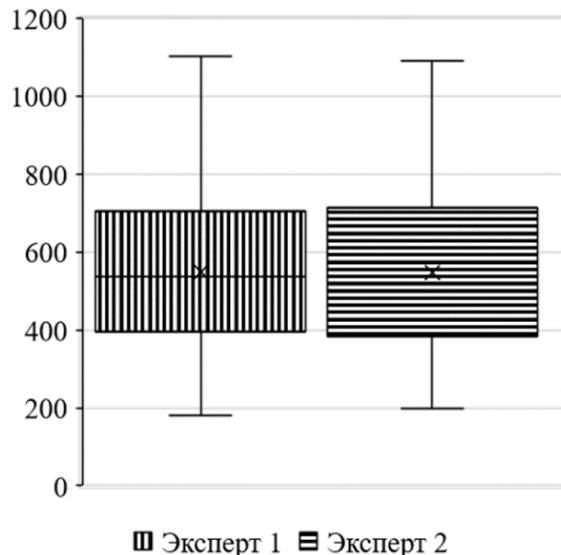


Рис. 2. Диаграмма распределения значений эффективного модуля упругости в выборках, полученных разными экспертами

2.2. Построение и сравнительный анализ зависимостей между модулями упругости и структурными свойствами губчатой костной ткани.

2.2.1. Зависимость модуля упругости от пористости. Для оценки влияния человеческого фактора на построение зависимостей, провели анализ межэкспертной надежности, в ходе которого сравнивали зависимости, построенные разными экспертами. На рисунке 3 представлены зависимости эффективного модуля упругости (E) от пористости (η).

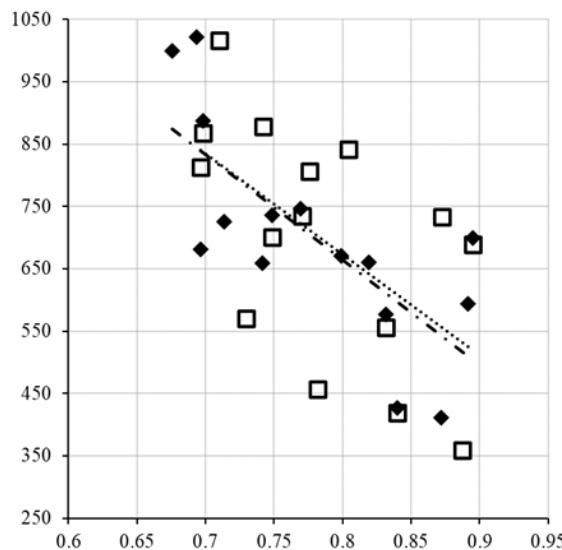


Рис. 3. Регрессионные зависимости эффективного модуля упругости (E в МПа, по вертикали) от пористости (η , по горизонтали): ромбы – эксперт 1 ($E = -1696.2\eta + 2020.9$, $R^2 = 0.56$); пустые квадраты – эксперт 2 ($E = -1902.5\eta + 2185.7$, $R^2 = 0.41$)

2.2.2. Зависимости модуля упругости от объемной и минеральной плотности. Обоими экспертами были построены зависимости эффективного модуля упругости от объемной плотности (BVD) и от минеральной плотности (BMD), показанные на рисунке 4.

Для строгого сравнения полученных зависимостей использовался метод косинусного сходства. Этот метод позволяет определить, насколько векторы (точки) сравниваемых графиков ориентированы в одном направлении. Результаты косинусного сходства между зависимостями, изображенными на рисунках 3 и 4 представлены в таблице 2.

2.3. Результаты экспериментов 2 и 3 типа (дополнительные эксперименты)
Описательные статистики для выборок, полученных в ходе экспериментов по повторному сжатию и по сжатию свежих и подсущенных образцов, представлены в таблицах 3 и 4 в виде среднего значения и стандартного отклонения, поскольку распределение в выборках являлось нормальным, что было доказано с помощью теста Шапиро-Уилка. Для визуализации распределения значений в выборках использовались диаграммы «ящики с усами» (рисунок 5).

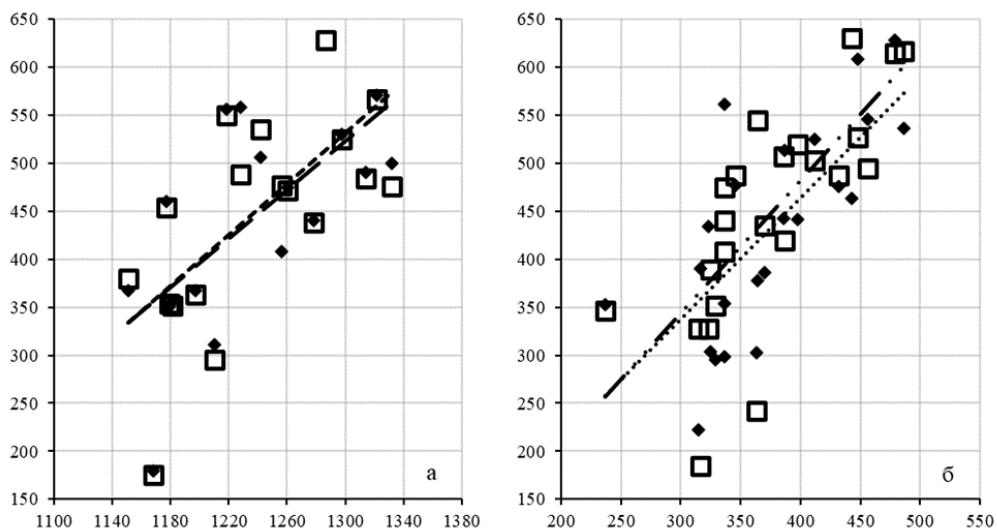


Рис. 4. Регрессионные зависимости эффективного модуля упругости (E в МПа, по вертикали) от объёмной плотности (BVD в $\text{г}/\text{cm}^3$, по горизонтали): пустые квадраты – эксперт 1 ($E = 1.2663BVD - 1123.6$, $R^2 = 0.44$), ромбы – эксперт 2 ($E = 1.1903BVD - 898.31$, $R^2 = 0.43$) (а); регрессионные зависимости эффективного модуля упругости (E в МПа, по вертикали) от минеральной плотности (BMD в $\text{г}/\text{cm}^3$, по горизонтали): пустые квадраты – эксперт 1 ($E = 0.9978BMD + 74.435$, $R^2 = 0.60$), ромбы – эксперт 2 ($E = 1.0751 BMD - 68.456$, $R^2 = 0.55$) (б)

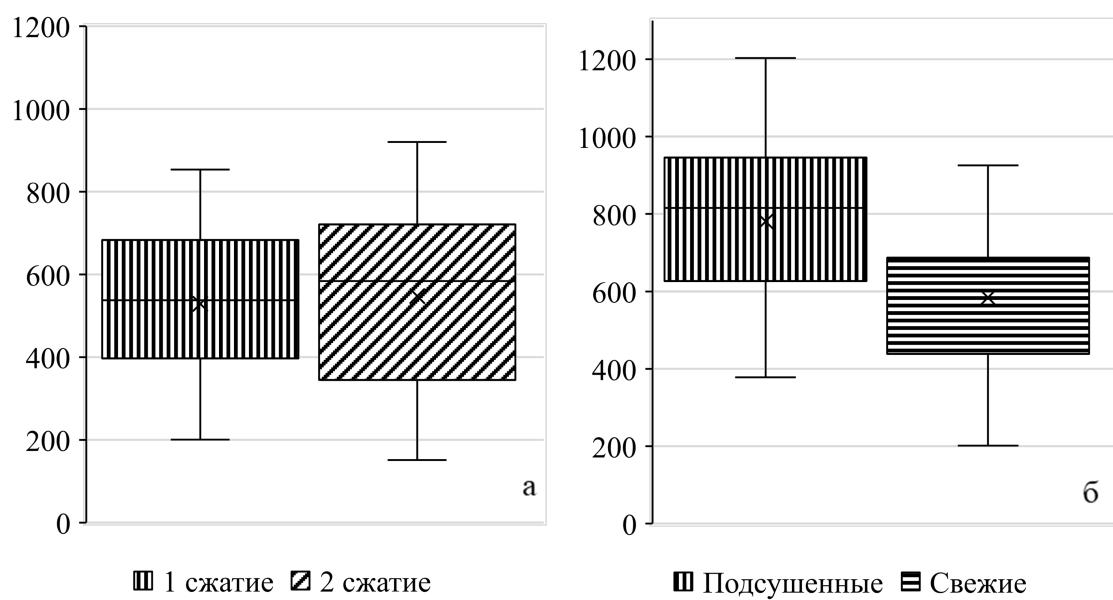


Рис. 5. Диаграмма распределения значений эффективного модуля упругости при повторном сжатии образцов (а) и при сжатии свежих и подсушенных образцов (б)

	Q_1	Ме	Q_3
Пористость	0,693194	0,892177	0,9780868
BVD	0,893786	0,965368	0,9945394
BMD	0,949987	0,984413	0,9968115

Таблица 1. Описательные статистики выборок с эффективными модулями упругости, полученные при сравнительном анализе разными экспертами. Здесь Q_1 – первый квартиль, Q_3 – третий квартиль, Me – медиана

	AVE	SD
1 сжатие	529,04	172,2
2 сжатие	547,51	230,12

Таблица 2. Описательные статистики выборок с эффективными модулями упругости, полученные в ходе экспериментов по повторному сжатию. Здесь AVE – среднее значение, SD – стандартное отклонение

	AVE	SD
Подсушенные	781,29	247,15
Свежие	584,22	215,3

Таблица 3. Описательные статистики, полученные в ходе сравнения выборок с эффективными модулями упругости свежих и подсушенных образцов. Здесь AVE – среднее значение, SD – стандартное отклонение

3. Обсуждение В клинической практике важно, чтобы результаты оценок механических характеристик биологических материалов были согласованы между разными специалистами. Это особенно актуально при принятии решений о лечении, хирургическом вмешательстве или реабилитации. В этой связи целесообразно прибегать к оценке межэкспертной надежности полученных результатов. Несогласованность может быть обусловлена уровнем квалификации, наличием опыта, заинтересованностью эксперта, а также методом исследования.

В текущем исследовании в рамках экспериментов 1 типа была проведена сравнительная оценка данных, полученных двумя экспертами. С целью анализа межэкспертной согласованности были применены статистические методы, метод косинусного сходства, а также визуализация результатов с использованием графиков. В результате анализа нам удалось получить достаточно высокие показатели надежности расчета разными экспертами эффективного модуля упругости костной ткани, а также при построении зависимостей эффективного модуля упругости от структурных свойств кости (пористость, минеральная

плотность, объемная плотность). Так как в рамках данного исследования модуль упругости вычислялся вручную по линейному участку на диаграмме сжатия, то вероятность расхождения полученных результатов могла быть достаточно велика. Однако, диаграмма размаха (рисунок 2) наглядно демонстрирует, что различия между вычислениями незначительны. Это подтверждает критерий Манна-Уитни, с помощью которого было выявлено, что статистически значимых различий между вычислениями отдельных экспертов нет (таблица 1). Исходя из этого можно предположить, что такая согласованность результатов может быть обусловлена следующими факторами: использование одного и того же метода вычисления эффективного модуля упругости, схожий уровень подготовки и опыт специалистов, поскольку в качестве экспертов выступали студенты.

В контексте построения зависимостей эффективного модуля упругости от структурных свойств костной ткани необходимо отметить, что каждый эксперт принимал самостоятельные решения относительно выбора и удаления выбросов — показателей, которые существенно отклоняются от остальных наблюдений. Обработка выбросов имеет критическое значение, поскольку они могут вносить искажения в результаты анализа. Это подчеркивает возможность существования различий в зависимостях, построенных различными экспертами. Тем не менее, результаты проведенного исследования (рисунки 4 и 5) продемонстрировали визуальное сходство этих зависимостей, а применение метода косинусного сходства для более детального анализа подтвердило высокую степень схожести между полученными результатами. Такая согласованность может быть обусловлена теми же факторами, что и при сравнении эффективных модулей упругости костной ткани, так как все эксперты при построении зависимостей использовали одинаковые показатели структурных характеристик костной ткани.

Далее перейдем к обсуждению результатов дополнительных экспериментов по одноосному сжатию, проведенных в рамках данного исследования. Результаты экспериментов 2 типа позволяют предположить, что костная ткань демонстрирует достаточно высокую сопротивляемость к механическим нагрузкам, что выражается в относительной стабильности модуля упругости в процессе испытаний. Данное наблюдение иллюстрируется диаграммой размаха (рисунок 5 а), которая наглядно демонстрирует незначительный разброс показателей модуля упругости. Результаты дисперсионного анализа ANOVA также подтверждают, что различия между значениями модулей упругости при первом и повторном сжатии не являются статистически значимыми (таблица 2).

Совершенно иную картину демонстрируют результаты экспериментов 3 типа. Дисперсионный анализ позволил установить, что разница между значениями модуля упругости свежих и несвежих образцов является статистически значимой (таблица 3). Данная информация визуализирована на диаграмме размаха

(рисунок 5 б). Основываясь на этом, можно предположить, что хранение образцов кости при комнатной температуре в течение 7 суток оказывает существенное влияние на их жесткость и, соответственно, на эффективный модуль упругости.

4. Выводы Показана межэкспертная надежность при оценке эффективного модуля упругости, рассчитываемого по стержневой теории в рамках односторонних экспериментов по сжатию губчатой кости крупного рогатого скота, а также межэкспертная надежность при построении зависимостей эффективного модуля упругости от структурных свойств кости (пористость, минеральная плотность, объемная плотность). Выявлено, что при повторном сжатии губчатой кости модуль упругости практически не меняется. При этом выявлено, что хранение образцов кости при комнатной температуре в течение 7 суток оказывает существенное влияние на эффективный модуль упругости: в среднем он увеличивается в 1.3 раза.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. В. В. Акимова проведение экспериментов, обработка результатов, подготовка текста статьи, М. А. Бударина проведение экспериментов, обработка результатов, подготовка текста статьи, Т. Ю. Нефедова проведение экспериментов, Д. В. Иванов планирование экспериментов, обработка результатов, подготовка текста статьи.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках Государственного задания FSRR-2023-0009 и при поддержке Фонда Потанина.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. V. V. Akimova conducting experiments, processing results, preparing the text of the article, M. A. Budarina conducting experiments, processing results, preparing the text of the article, T. Yu. Nefedova conducting experiments, D. V. Ivanov planning experiments, processing results, preparing the text of the article.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding. The work was carried out within the framework of the State Assignment FSRR-2023-0009 and with the support of the Potanin Foundation.

ЛИТЕРАТУРА

1. Численный анализ напряженно-деформированного состояния остеотомий первой плюсневой кости / А. В. Полиенко [и др.] // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2023. – Т. 23, № 4. – С. 496–511.
2. Разработка системы поддержки принятия врачебных решений в травматологии и ортопедии. Биомеханика как инструмент предоперационного планирования / А. С. Бескровный [и др.] // Российский журнал биомеханики. – 2021. – Т. 25, № 2. – С. 118–133.
3. Иванов Д. В. Биомеханическая поддержка решения врача при выборе варианта лечения на основе количественных критериев оценки успешности // Известия

- Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 62–89.
4. Извлечение клинически значимых данных из биомеханического моделирования вариантов хирургического лечения травмы позвоночника при повреждении позвонков Th10, Th11 / А. М. Донник [и др.] // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 439–453.
 5. Методология «планирование – моделирование – прогнозирование» для предоперационного планирования в травматологии-ортопедии / Л. В. Бессонов [и др.] // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2024. – Т. 24, № 3. – С. 359–380.
 6. On the question of the effect of the loading method on the cancellous bone effective elasticity modulus / I. F. Parshina [et al.] // Mechanics of Solids. – 2024. – Vol. 59, no. 7. – P. 3870–3879.
 7. Разработка и апробация мобильного стенда по исследованию механических свойств биологических тканей / И. Ф. Паршина [и др.] // Российский журнал биомеханики. – 2024. – Т. 28, № 3. – С. 39–46.
 8. Influence of osteoporosis on the compressive properties of femoral cancellous bone and its dependence on various density parameters / F. Metzner [et al.] // Sci Rep. – 2021. – Vol. 11, no. 1. – P. 13284. – DOI: 10.1038/s41598-021-92685-z.
 9. The effects of force application on the compressive properties of femoral spongy bone / F. Metzner [et al.] // Clin Biomech (Bristol). – 2023. – Vol. 101. – P. 105866. – DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2022.105866.
 10. Experimentally-based multiscale model of the elastic moduli of bovine trabecular bone and its constituents / E. Hamed [et al.] // Mater Sci Eng C Mater Biol Appl. – 2015. – Vol. 54. – P. 207–216. – DOI: 10.1016/j.msec.2015.02.044.
 11. Structural strength of cancellous specimens from bovine femur under cyclic compression / K. Endo [et al.] // PeerJ. – 2016. – Vol. 4. – P. 1562. – DOI: 10.7717/peerj.1562.
 12. К вопросу об изучении структурных и механических характеристик губчатой костной ткани крупного рогатого скота / И. Ф. Паршина [и др.] // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2025. – Т. 25, № 2. – С. 231–245. – DOI: 10.18500/1816-9791-2025-25-2-231-245.

REFERENCES

1. Numerical analysis of the stress-strain state of osteotomies of the first metatarsal / A. V. Polienko [et al.] // Proceedings of the Saratov University. A new series. Series: Mathematics. Mechanics. Computer science. – 2023. – Vol. 23, no. 4. – P. 496–511. – (in Russian).
2. Development of a medical decision support system in traumatology and orthopedics. Biomechanics as a tool for preoperative planning / A. S. Beskrovny [et al.] // Russian Journal of Biomechanics. – 2021. – Vol. 25, no. 2. – P. 118–133. – (in Russian).
3. Ivanov D. V. Biomechanical support for a doctor's decision when choosing a treatment option based on quantitative criteria for evaluating success // Proceedings of

- the Saratov University. A new series. Series: Mathematics. Mechanics. Computer science. – 2022. – Vol. 22, no. 1. – P. 62–89. – (in Russian).
4. Extracting clinically significant data from biomechanical modeling of surgical treatment options for spinal injury in case of damage to the vertebrae Th10, Th11 / A. M. Donnik [et al.] // Proceedings of the Saratov University. A new series. Series: Mathematics. Mechanics. Computer science. – 2019. – Vol. 19, no. 4. – P. 439–453. – (in Russian).
 5. Methodology of "planning - modeling - forecasting" for preoperative planning in traumatology-orthopedics / L. V. Bessonov [et al.] // Proceedings of the Saratov University. A new series. Series: Mathematics. Mechanics. Computer science. – 2024. – Vol. 24, no. 3. – P. 359–380. – (in Russian).
 6. On the question of the effect of the loading method on the cancellous bone effective elasticity modulus / I. F. Parshina [et al.] // Mechanics of Solids. – 2024. – Vol. 59, no. 7. – P. 3870–3879.
 7. Development and testing of a mobile stand for the study of the mechanical properties of biological tissues / I. F. Parshina [et al.] // Russian Journal of Biomechanics. – 2024. – Vol. 28, no. 3. – P. 39–46. – (in Russian).
 8. Influence of osteoporosis on the compressive properties of femoral cancellous bone and its dependence on various density parameters / F. Metzner [et al.] // Sci Rep. – 2021. – Vol. 11, no. 1. – P. 13284. – DOI: [10.1038/s41598-021-92685-z](https://doi.org/10.1038/s41598-021-92685-z).
 9. The effects of force application on the compressive properties of femoral spongy bone / F. Metzner [et al.] // Clin Biomech (Bristol). – 2023. – Vol. 101. – P. 105866. – DOI: [10.1016/j.clinbiomech.2022.105866](https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2022.105866).
 10. Experimentally-based multiscale model of the elastic moduli of bovine trabecular bone and its constituents / E. Hamed [et al.] // Mater Sci Eng C Mater Biol Appl. – 2015. – Vol. 54. – P. 207–216. – DOI: [10.1016/j.msec.2015.02.044](https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.02.044).
 11. Structural strength of cancellous specimens from bovine femur under cyclic compression / K. Endo [et al.] // PeerJ. – 2016. – Vol. 4. – P. 1562. – DOI: [10.7717/peerj.1562](https://doi.org/10.7717/peerj.1562).
 12. On the issue of studying the structural and mechanical characteristics of spongy bone tissue of cattle / I. F. Parshina [et al.] // Proceedings of the Saratov University. A new series. Series: Mathematics. Mechanics. Computer science. – 2025. – Vol. 25, no. 2. – P. 231–245. – DOI: [10.18500/1816-9791-2025-25-231-245](https://doi.org/10.18500/1816-9791-2025-25-231-245). – (in Russian).