



Check for updates

<https://www.doi.org/10.33910/2686-9519-2026-18-3-803-812>
<https://www.zoobank.org/References/B39DF1E4-4FEA-4CEC-850E-7845F9CCC39B>

УДК 57.087

Оценка возможности использования современных цифровых методов в морфологических исследованиях скелетов позвоночных животных на примере черепа озёрной лягушки *Pelophylax ridibundus* (Ranidae, Anura) с созданием VR-приложения

К. Ю. Степанова[✉], Д. А. Гордеев, В. П. Радченко

Волгоградский государственный университет, пр-т Университетский, д. 100, 400062, г. Волгоград, Россия

Сведения об авторах

Степанова Ксения Юрьевна
E-mail: bb-231_245455@volsu.ru
ORCID: 0009-0003-0857-0120

Гордеев Дмитрий Анатольевич
E-mail: dmitriy8484@bk.ru
SPIN-код: 3048-8631
Scopus Author ID: 57218338662
ResearcherID: AAJ-8567-2021
ORCID: 0000-0002-4346-7626

Радченко Виктор Павлович
E-mail: viktor.radchenko@volsu.ru
SPIN-код: 1771-8970
Scopus Author ID: 57205398097
ORCID: 0000-0002-3786-3884

Аннотация. В статье представлены результаты оценки возможности применения 3D-моделирования в морфологии позвоночных. На примере черепов озёрной лягушки (*Pelophylax ridibundus*), отсканированных с помощью 3D-сканера Range Vision и обработанных в программе Blender, проведён сравнительный анализ традиционных и цифровых методов краниометрии. Сравнение с использованием t-критерия Стьюдента показало отсутствие статистически значимых различий между штангенциркулем и 3D-моделированием ($p > 0,05$), что подтверждает их методическую эквивалентность. На основе 3D-моделей разработано VR-приложение в Unity для интерактивного изучения черепов из университетской коллекции. Работа демонстрирует, что 3D-моделирование — достаточно точная альтернатива традиционным методам, а его интеграция с VR открывает новые возможности для цифровизации биологического образования и сохранения коллекций.

Права: © Авторы (2026). Опубликовано Российским государственным педагогическим университетом им. А. И. Герцена. Открытый доступ на условиях лицензии CC BY-NC 4.0.

Ключевые слова: 3D-моделирование, VR, позвоночные животные, озёрная лягушка, *Pelophylax ridibundus*

Assessment of the potential of modern digital methods in morphological studies of vertebrate skeletons: A case study of the marsh frog skull *Pelophylax ridibundus* (Ranidae, Anura) with the development of a VR application

K. Yu. Stepanova✉, D. A. Gordeev, V. P. Radchenko

Volgograd State University, 100 Universitetskiy Ave., 400062, Volgograd, Russia

Authors

Ksenia Yu. Stepanova

E-mail: bb-231_245455@volsu.ru

ORCID: 0009-0003-0857-0120

Dmitry A. Gordeev

E-mail: dmitriy8484@bk.ru

SPIN: 3048-8631

Scopus Author ID: 57218338662

ResearcherID: AAJ-8567-2021

ORCID: 0000-0002-4346-7626

Viktor P. Radchenko

E-mail: viktor.radchenko@volsu.ru

SPIN: 1771-8970

Scopus Author ID: 57205398097

ORCID: 0000-0002-3786-3884

Copyright: © The Authors (2026).

Published by Herzen State Pedagogical University of Russia. Open access under CC BY-NC License 4.0.

Abstract. The article presents the results of an assessment of the applicability of 3D modelling in vertebrate morphology. Using marsh frog (*Pelophylax ridibundus*) skulls scanned with a Range Vision 3D scanner and processed in Blender, a comparative analysis of traditional and digital craniometric methods was conducted. Comparison using Student's t-test showed no statistically significant differences between caliper measurements and 3D modeling ($p > 0.05$), confirming their methodological equivalence. Based on the 3D models, a VR application was developed in Unity for the interactive study of skulls from the university collection. The study demonstrates that 3D modelling is a sufficiently accurate alternative to traditional methods, and its integration with VR opens new opportunities for the digitalisation of biological education and the preservation of collections.

Keywords: 3D modeling, VR, vertebrate animals, marsh frog, *Pelophylax ridibundus*

Введение

Исследования, направленные на изучение морфолого-анатомических особенностей позвоночных животных, всегда являлись одним из главных подходов к анализу как межвидовой, так и внутривидовой изменчивости. Однако традиционные подходы часто ограничены трудоёмкостью, сложностью хранения и демонстрации образцов. В отличие от генетических исследований, где исходные данные ДНК могут быть размещены в открытом доступе (GenBank), морфологические исследования обычно ограничиваются публикацией измерений или фотографий, что существенно снижает объём и детализацию информации. Использование разных систем промеров затрудняет сопоставление результатов и ограничивает возможности дальнейшего анализа. Для повторного исследования часто требуется физический доступ к коллекциям образцов, что может быть сложно или невозможно из-за

удалённости хранения. В свою очередь, 3D-сканирование позволяет оцифровывать целые скелеты и отдельные кости. На основе высокоточных сканов создают 3D-модели, которые воспроизводят облик давно исчезнувших животных, что показано в различных работах по виртуальной реконструкции динозавров, цифровой реставрации ископаемых с использованием специализированных программ (Schilling et al. 2014; DeVries et al. 2022) и обзору экспериментальных методов в палеонтологии (Johnson et al. 2019; Brenna et al. 2020). С помощью таких 3D-моделей можно изучать микроструктуру костей, делать выводы о внешности, образе жизни, болезнях и травмах животных. Также 3D-модели помогают реконструировать кости, восстанавливать недостающие части и даже симулировать движения. Полученные таким образом модели могут храниться в специализированных репозиториях с возможностью удалённого доступа к данным интересующихся исследователей, например MorphoSource.

Использование технологий виртуальной реальности (virtual reality, VR) позволяет более эффективно изучать морфологию скелетов позвоночных животных благодаря визуализации в трёхмерном пространстве. Внедрение виртуальных технологий в процесс обучения способствует не только разработке универсальных навыков, необходимых для работы в условиях постоянных изменений и технологического прогресса, но и оживляет учебный процесс, делая его более увлекательным (Смирнов и др. 2020).

3D-моделирование и VR-технологии открывают новые возможности для детального анализа, визуализации и интерактивного изучения морфологических структур, облегчая доступ к научным данным, повышая качество образовательного процесса и создавая условия для проведения дистанционных исследований. В связи с этим целью работы является оценка возможности использования 3D-моделирования в морфологических исследованиях скелетов позвоночных животных и разработка VR-приложения для интерактивного изучения морфологических структур. Для её достижения были поставлены следующие задачи:

- 1) создать 3D-модели с помощью оптического 3D-сканера Range Vision;
- 2) провести сравнительный анализ традиционных методов (штангенциркуль), 3D-моделирования и анализа 2D-изображений (ImageJ) в морфологических исследованиях;
- 3) разработать и протестировать VR-приложение для интерактивного изучения 3D-моделей скелетов позвоночных животных;
- 4) оценить эффективность и перспективы применения VR-технологий в научных и образовательных целях.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования послужили 10 черепов озёрной лягушки (*Pelophylax ridibundus* (Pallas, 1771)) из зоологической коллекции кафедры биологии и биоинже-

нерии ФГАОУ ВО «ВолГУ». Выбор данного модельного объекта для сравнения методов краниометрии обусловлен простой и хорошо изученной морфологией черепа, а также наличием достаточного количества образцов ($n = 10$) для формирования статистически значимой выборки. Исследование проведено на фиксированных музейных образцах, работа с живыми животными не осуществлялась. Существующие работы демонстрируют успешное применение 3D-сканирования для краниометрии крупных млекопитающих (Казимиров и др. 2022). В настоящем исследовании данный метод был применён на объекте существенно меньших размеров и более хрупкого строения для апробации и оценки границ его применимости.

Для сравнения методов были выбраны четыре базовых линейных промера: общая длина черепа, ширина черепа, расстояние между глазницами и высота черепа. Измерения были проведены:

Классическим методом: цифровой штангенциркуль QST EXPRESS 0,01–150 mm (точность: $\pm 0,03$ мм).

Методом 3D-оцифровки: с помощью оптического 3D-сканера Range Vision Spectrum (точность: 0,04–0,12 мм). Использовалось ПО для просмотра 3D-моделей «Microsoft 3D Viewer», последующая доработка и измерения осуществлялись в приложении «Blender» (версия 4.3.2).

Методом анализа 2D-изображений: фотографии, снятые камерой Canon EOS 50D с объективом Canon 24-70 L и масштабной линейкой. Для измерения использовалось ПО ImageJ.

Статистический анализ включал попарное сравнение методов с использованием *t*-критерия Стьюдента и общее сравнение трёх методов с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) в программе PAST. Создание VR-приложения было осуществлено на кроссплатформенной среде разработки «Unity» с интеграцией плагинов для запуска через VR-устройство PICO 4.

Результаты

Череп озёрной лягушки характеризуется типичным для бесхвостых амфибий строением: широкий плоский череп с большими глазницами и обширной роstralной областью. При формировании выборки не проводился отбор по полу или географическому происхождению особей. Все черепа рассматривались как случайная выборка для сравнения точности выбранных методик измерений.

Полученные после сканирования 3D-модели (рис. 1) с высокой точностью передают общую морфологию и основные пропорции черепов, что подтверждается статистическим сравнением измерений. Однако у данного метода есть ограничение — разрешение сканирования может быть недостаточным для корректного отображения очень мелких структур. Такие элементы на модели могут сливаться, искажаться или отсутствовать.

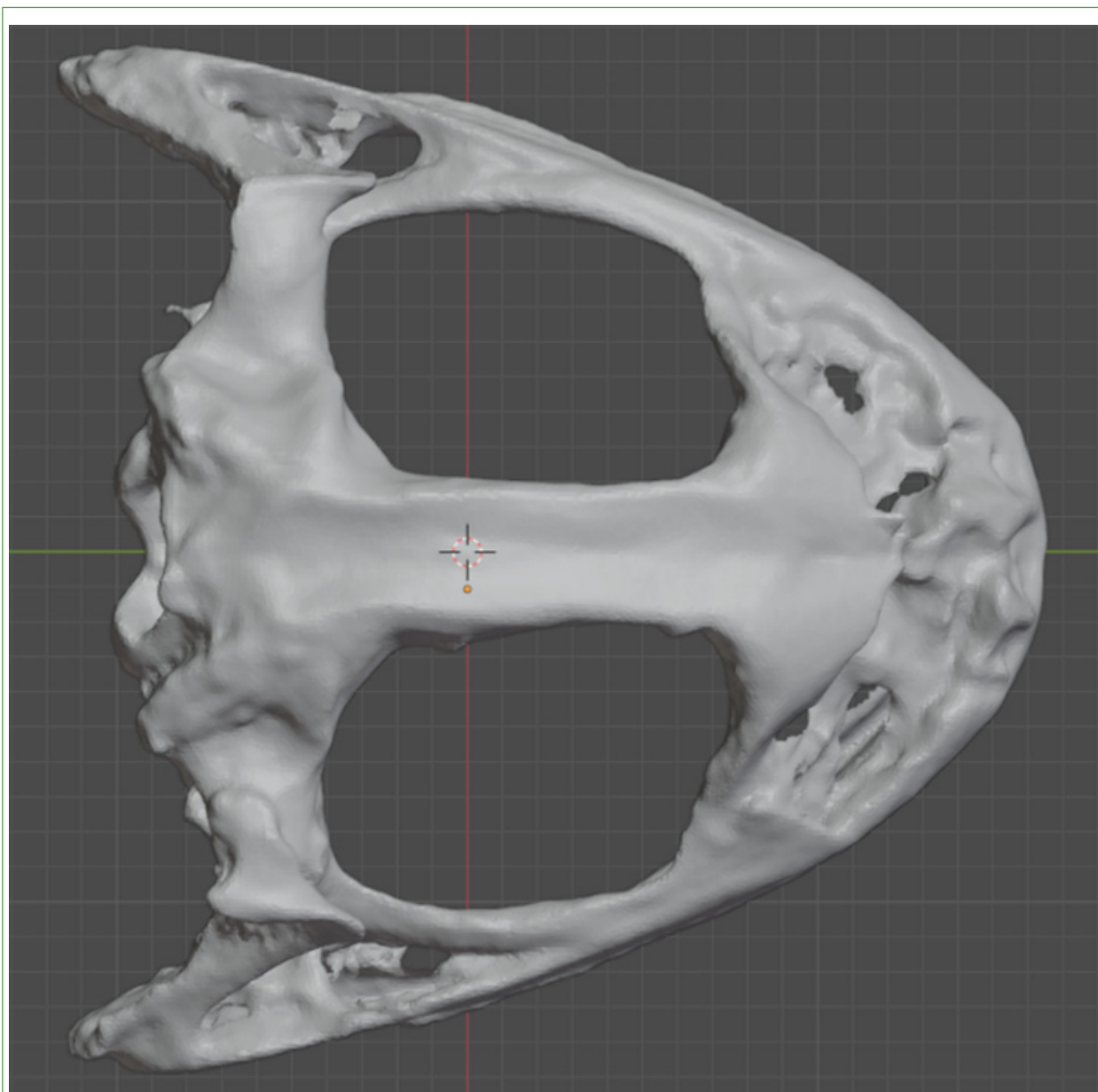


Рис. 1. 3D-модель черепа *P. ridibundus*, дорсальная проекция. Модель получена с помощью оптического сканера Range Vision Spectrum и обработана в программе Blender
Fig. 1. 3D model of the *P. ridibundus* skull, dorsal view. The model was obtained using a Range Vision Spectrum optical scanner and processed in Blender

Для проведения сравнительного анализа, помимо 3D-сканирования, были использованы фотографии черепов особей озёрной лягушки с масштабной линейкой (рис. 2), которые служили основой для измерений в программе ImageJ.

Разброс различий между средними значениями, полученными всеми тремя методами, составил от 0,02 до 1,60 мм в

зависимости от измерения. Общий статистический анализ (табл. 1) показал, что для параметров «расстояние между глазами» и «высота черепа» наблюдаются статистически значимые различия между методами ($p < 0,05$). Для параметров «общая длина черепа» и «ширина черепа» различия не являются статистически значимыми ($p > 0,05$).



Рис. 2. Череп *P. ridibundus*, дорсальная проекция. Из коллекции кафедры биологии и биоинженерии ФГАОУ ВО «ВолГУ», г. Волгоград. Масштабная линейка — 10 мм

Fig. 2. *P. ridibundus* skull, dorsal view. From the collection of the Department of Biology and Bioengineering, Volgograd State University (VolSU), Volgograd. Scale bar — 10 mm

Таблица 1

Сводные результаты измерений черепа озёрной лягушки (n = 10) тремя методами и результаты дисперсионного анализа (p-значение)

Table 1

Summary results of measurements of the marsh frog skull (n = 10) by three methods and the results of analysis of variance (p-value)

Параметр	Штангенциркуль, мм		3D, мм		ImageJ, мм		p
	Min–Max	M ± m	Min–Max	M ± m	Min–Max	M ± m	
Общая длина черепа	23,09–28,47	26,23 ± 0,58	22,43–30,11	26,25 ± 0,74	24,95–31,03	27,51 ± 0,68	0,318
Ширина черепа	22,44–32,55	27,88 ± 1,00	22,56–32,73	28,01 ± 0,99	24,96–33,27	29,35 ± 0,86	0,494
Расстояние между глазами	3,53–5,40	4,64 ± 0,17	4,22–5,55	4,88 ± 0,14	4,17–6,57	5,35 ± 0,20	0,019
Высота черепа	10,37–14,19	11,95 ± 0,35	10,63–14,65	12,27 ± 0,38	10,78–16,10	13,55 ± 0,60	0,047

Min–Max — минимальное и максимальное значения; M ± m — среднее арифметическое и ошибка средней; p — уровень значимости по результатам однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA).

Min–Max — minimum and maximum values; M ± m — arithmetic mean and standard error of the mean; p — significance level according to the results of one-way analysis of variance (ANOVA)

Попарное сравнение методов (табл. 2) показало, что между измерениями, выполненными штангенциркулем и методом 3D-моделирования, отсутствуют статистически значимые различия по всем четырём параметрам ($p > 0,05$). При сравнении метода ImageJ с остальными методами (штангенциркуль и 3D-моделирование) для параметров «расстояние между глазами» и «высота черепа» наблюдаются статистически значимые различия ($p < 0,05$), что

может быть связано с особенностями работы с 2D-проекциями.

Наибольшее расхождение средних значений наблюдается между методом ImageJ и двумя другими методами. Все различия между штангенциркулем и 3D-моделированием находятся в пределах ошибки измерения и не являются статистически значимыми.

На рисунке 3 представлены диаграммы размаха (Boxplots), иллюстрирующие распределение значений для каждого па-

Таблица 2

Результаты попарного сравнения методов измерения черепа озёрной лягушки (n = 10) с использованием t-критерия Стьюдента (p-значения)

Table 2

Results of pairwise comparison of measurement methods of the marsh frog skull (n=10) using Student's t-test (p-values)

Параметр	Штангенциркуль / 3D	Штангенциркуль / ImageJ	3D / ImageJ
Общая длина черепа	0,98	0,17	0,23
Ширина черепа	0,93	0,28	0,32
Расстояние между глазами	0,27	0,01	0,07
Высота черепа	0,55	0,03	0,09

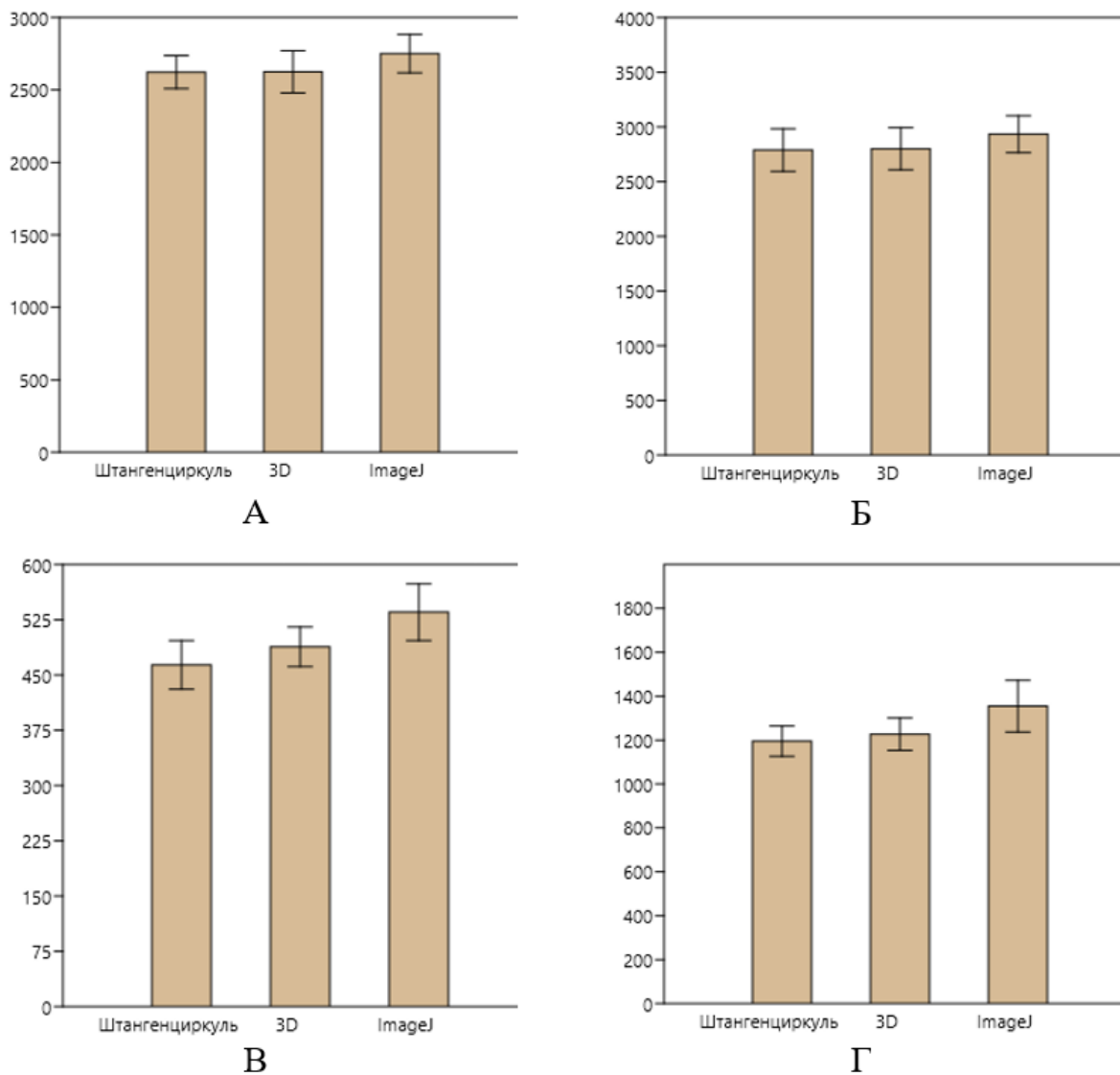


Рис. 3. Сравнение распределений краниометрических параметров черепа *P. ridibundus* (n = 10), измеренных тремя методами: цифровой штангенциркуль, 3D-модель (Blender), 2D-изображение (ImageJ). А — общая длина черепа; Б — ширина черепа; В — расстояние между глазницами; Г — высота черепа

Fig. 3. Comparison of the distributions of craniometric parameters of the *P. ridibundus* skull (n = 10) measured by three methods: digital caliper, 3D model (Blender), 2D image (ImageJ). А — total skull length; Б — skull width; В — interorbital distance; Г — skull height

раметра, измеренного тремя методами. Графики наглядно иллюстрируют выявленную статистическую картину: близкое совпадение распределений значений, полученных методами штангенциркуля и 3D-моделирования, и заметные отклонения в распределениях, полученных методом анализа 2D-изображений (ImageJ).

Результаты данного исследования свидетельствуют о полной методической эквивалентности классического контак-

ного и современного цифрового метода 3D-моделирования для проведения базовых краниометрических исследований на примере черепа озёрной лягушки.

На основе подтверждённой точности 3D-моделирования было разработано образовательное приложение для изучения зоологии в виртуальной реальности (рис. 4).

Пользователь погружается в интерактивное окружение, стилизованное под лесную среду, что способствует созданию



Рис. 4. Интерфейс VR-приложения. Пользователь изучает 3D-модель черепа серой цапли (*A. cinerea*). В приложении также доступны модели йеменского хамелеона (*C. calyptratus*), красноголового нырка (*A. ferina*) и филина (*B. bubo*)

Fig. 4. VR application interface. The user is examining a 3D model of a grey heron (*A. cinerea*) skull. Models of the Yemen chameleon (*C. calyptratus*), red-crested pochard (*A. ferina*), and eagle owl (*B. bubo*) are also available in the application

эффекта присутствия в естественной среде обитания представленных видов, повышает вовлечённость и мотивацию к изучению материала.

В приложение загружены высокодетализированные 3D-модели черепов четырёх видов животных из зоологической коллекции кафедры биологии и биоинженерии ФГАОУ ВО «ВолГУ»:

1. Хамелеон йеменский (*Chamaeleo calyptratus*);
2. Цапля серая (*Ardea cinerea*);
3. Филин (*Bubo bubo*);
4. Красноголовый нырок (*Aythya ferina*).

Выбор объектов для VR-приложения был обусловлен наличием в цифровом архиве кафедры высокодетализированных и

верифицированных 3D-моделей черепов птиц и рептилий, полученных ранее. Эти модели, в отличие от сканов черепов лягушек, обладали оптимальным для визуализации в VR уровнем детализации, поскольку мелкие структуры на миниатюрных черепках амфибий при сканировании могли теряться.

Пользователь может взять любой череп в руки (с помощью контроллеров), свободно вращать его и детально рассматривать со всех ракурсов.

К каждому объекту прилагается лаконичная научно-популярная справка, содержащая данные о виде, особенностях его морфологии, питания и образа жизни, что превращает осмотр в образовательный процесс.

Приложение создано с использованием ПО для разработки «Unity» с интеграцией плагинов для запуска через VR-устройство PICO 4. 3D-модели были получены путём сканирования реальных экспонатов, что гарантирует их научную достоверность. Разработанное VR-приложение было протестировано и показало функциональную и практическую значимость в образовательном процессе.

Заключение

Сравнительный анализ показал полное отсутствие статистически значимых различий между традиционным методом краниометрии (штангенциркуль) и 3D-моделированием по всем исследуемым параметрам. Оба метода демонстрируют высокую степень согласованности и могут считаться взаимозаменяемыми. Метод анализа на основе 2D-изображений (ImageJ) показал статистически значимые расхожде-

ния с остальными методами по некоторым параметрам (расстояние между глазницами и высота черепа), что указывает на необходимость его дальнейшей валидации и учёта специфики работы с 2D-изображениями в краниометрических исследованиях.

Помимо эквивалентной точности, 3D-моделирование обладает ключевыми преимуществами: неразрушающий характер работы с объектом, возможность неограниченных повторных измерений и комплексного анализа с одной цифровой копии, а также обеспечение долговременной архивации и доступности данных.

Разработанное на основе метода 3D-моделирования образовательное VR-приложение демонстрирует практическую значимость. Оно позволяет сохранять, изучать и популяризировать музейные коллекции через создание интерактивных платформ с достоверными цифровыми моделями экспонатов.

Литература

- Казимиров, П. А., Леонтьев, С. В., Нечаева, А. В. и др. (2022) Популяционно-генетическая структура степного волка России и Казахстана по микросателлитным локусам. *Генетика*, т. 58, № 11, с. 1261–1272. <https://doi.org/10.31857/S0016675822110042>
- Смирнов, А. С., Фадеев, К. А., Аликовская, Т. А. и др. (2020) Технологии виртуальной реальности в образовательном процессе: перспективы и опасности. *Информатика и образование*, № 6 (315), с. 4–16. <https://doi.org/10.32517/0234-0453-2020-35-6-4-16>
- Brenna, C., Khan, A. M., Picascia, T. et al. (2020) New technical approaches for 3D morphological imaging and quantification of measurements. *Anatomical Record*, vol. 303, no. 10, pp. 2702–2715. <https://doi.org/10.1002/ar.24463>
- DeVries, R. P., Sereno, P. C., Vidal, D., Baumgart, S. L. (2022) Reproducible digital restoration of fossils using *Blender*. *Frontiers in Earth Science*, vol. 10, article 833379. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.833379>
- Johnson, E. H., Carter, A. M. (2019) Defossilization: A review of 3D printing in experimental paleontology. *Frontiers in Ecology and Evolution*, vol. 7, article 430. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00430>
- Schilling, R., Jastram, B., Wings, O. et al. (2014) Reviving the dinosaur: Virtual reconstruction and three-dimensional printing of a dinosaur vertebra. *Radiology*, vol. 270, no. 3, pp. 864–871. <https://doi.org/10.1148/radiol.13130666>

References

- Brenna, C., Khan, A. M., Picascia, T. et al. (2020) New technical approaches for 3D morphological imaging and quantification of measurements. *Anatomical Record*, vol. 303, no. 10, pp. 2702–2715. <https://doi.org/10.1002/ar.24463> (In English)
- DeVries, R. P., Sereno, P. C., Vidal, D., Baumgart, S. L. (2022) Reproducible digital restoration of fossils using *Blender*. *Frontiers in Earth Science*, vol. 10, article 833379. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.833379> (In English)
- Johnson, E. H., Carter, A. M. (2019) Defossilization: A review of 3D printing in experimental paleontology. *Frontiers in Ecology and Evolution*, vol. 7, article 430. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00430> (In English)
- Kazimirov, P. A., Leontyev, S. V., Nechaeva, A. V. et al. (2022) Population genetic structure of the steppe wolf of Russia and Kazakhstan by microsatellite loci. *Genetika*, vol. 58, no. 11, pp. 1261–1272. <https://doi.org/10.31857/S0016675822110042> (In Russian)

- Schilling, R., Jastram, B., Wings, O. et al. (2014) Reviving the dinosaur: Virtual reconstruction and three-dimensional printing of a dinosaur vertebra. *Radiology*, vol. 270, no. 3, pp. 864–871. <https://doi.org/10.1148/radiol.13130666> (In English)
- Smirnov, A. S., Fadeev, K. A., Alikovskaia, T. A. et al. (2020) Virtual reality technologies in the educational process: Prospects and dangers. *Informatics and Education*, no. 6 (315), pp. 4–16. <https://doi.org/10.32517/0234-0453-2020-35-6-4-16> (In Russian)

Для цитирования: Степанова, К. Ю., Гордеев, Д. А., Радченко, В. П. (2026) Оценка возможности использования современных цифровых методов в морфологических исследованиях скелетов позвоночных животных на примере черепа озёрной лягушки *Pelophylax ridibundus* (Ranidae, Anura) с созданием VR-приложения. *Амурский зоологический журнал*, т. XVIII, № 3, с. 803–812. <https://www.doi.org/10.33910/2686-9519-2026-18-3-803-812>

Получена 23 марта 2026; прошла рецензирование 24 апреля 2026; принята 5 мая 2026.

For citation: Stepanova, K. Yu., Gordeev, D. A., Radchenko, V. P. (2026) Assessment of the potential of modern digital methods in morphological studies of vertebrate skeletons: A case study of the marsh frog skull *Pelophylax ridibundus* (Ranidae, Anura) with the development of a VR application. *Amurian Zoological Journal*, vol. XVIII, no. 3, pp. 803–812. <https://www.doi.org/10.33910/2686-9519-2026-18-3-803-812>

Received 23 March 2026; reviewed 24 April 2026; accepted 5 May 2026.