

## АНАЛИЗ СХОДСТВА КОСТЕЙ ЛУЧЕЙ КИСТИ ЧЕЛОВЕКА

Ермоленко А.С.

*ГУЗ «Ульяновский областной клинический центр специализированных видов медицинской помощи им. заслуженного врача России Е.М. Чучкалова», Ульяновск, e-mail: osteon@yandex.ru*

Цель исследования – изучить сходство структурных элементов лучей кисти человека. В данной работе использованы результаты морфометрии паспортизированных рентгенограмм кистей 100 мужчин и 100 женщин, которая включала длину, ширину оснований, тел и головок пястных костей и фаланг I–V пальцев, измеренные в мм. Анализ сходства/различий рентгеноостеометрических показателей костей лучей кистей выполнен при помощи многомерного масштабирования. Результаты исследования демонстрируют, что инфраструктура сходства между рентгеноостеометрическими показателями элементов лучей кисти отражается в их структуре, организация которой, независимо от пола, демонстрирует градиент в композиционных отношениях между пястными костями и фалангами пальцев в пространстве многомерного масштабирования в виде двух групп: пястные кости/проксимальные фаланги и средние фаланги/дистальные фаланги, при этом средние и дистальные фаланги демонстрируют большее сходство, чем пястные кости и проксимальные фаланги. Полученные модели конфигураций демонстрируют хорошее качество подгонки в пространстве многомерного масштабирования, о чём свидетельствуют низкие значения напряжения, указывая на лучшее соответствие между данными и их визуализацией. Полученные результаты позволяют предположить, что композиционные отношения между показателями пястных костей и фаланг пальцев являются латентными проявлениями структурной организации лучей кисти в виде анатомических модулей.

Ключевые слова: кисть человека, фаланги, пястные кости, лучи кисти, многомерное масштабирование.

## ANALYSIS OF THE SIMILARITY OF THE BONES OF THE RAYS OF THE HUMAN HAND

Ermolenko A.S.

*Doctor Chuchkalov Ulyanovsk Regional Clinical Center of Specialized Types of Medical Care, Ulyanovsk; e-mail: osteon@yandex.ru*

The purpose of the study is to study the similarity of the structural elements of the rays of the human hand. In this work, the results of morphometry of certified radiographs of the hands of 100 men and 100 women were used, which included the length, width of the bases, bodies and heads of the metacarpal bones and phalanges of the I–V fingers measured in mm. The analysis of the similarity/differences of the X-ray osteometric parameters of the bones of the rays of the hands was performed using multidimensional scaling. The results of the study demonstrate that the infrastructure of similarity between the X-ray osteometric indicators of the hand ray elements is reflected in their structure, the organization of which, regardless of gender, demonstrates a gradient in the compositional relations between the metacarpal bones and phalanges of the fingers in the multidimensional scaling space in the form of two groups metacarpal bones/proximal phalanges and middle phalanges/distal phalanges, while the middle and distal phalanges they show greater similarity than metacarpal bones and proximal phalanges. The resulting configuration models demonstrate good fit quality in the multidimensional scaling space, as evidenced by low voltage values indicating a better match between the data and their visualization. The results obtained suggest that the compositional relationships between the indices of the metacarpal bones and phalanges of the fingers are latent manifestations of the structural organization of the rays of the hand in the form of anatomical modules.

Keywords: human hand, metacarpal bones, phalanges, hand rays, multidimensional scaling.

Организация сложных анатомических частей тела человека, таких как дистальные сегменты верхних конечностей кисти, – один из аспектов морфологии посткраниального скелета. Кисти – пример анатомических структур, которые в ходе филогенеза достигли функционального совершенства у Homo sapiens, но на удивление консервативны в контексте своего строения на протяжении длительного периода эволюционной истории. Понимание

того, как отдельные сегменты формируют сложную архитектуру кисти, является одной из актуальных задач в анатомии человека.

Кисти (autopodium) человека, как и у приматов, состоят из трёх отделов: запястье (basipodium), пясть (metapodium), пальцы (acropodium) [1]. Кости пясти и фаланги соответствующих им пальцев образуют лучи кисти [2]. Несмотря на то, что наблюдается градиент в длине костей лучей, как в продольной так и поперечной оси, обуславливая унилатеральные различия, а также вариации соотносительной длины указательного и безымянного пальцев, определяющих морфологический тип кисти, пястные кости и фаланги пальцев имеют аналогичное строение: у них выделяют основание, тело и головку [3, с. 57].

Сравнение частей анатомических структур – это обширная область статистического анализа, включающая в себя несколько аспектов. В основе любого сравнения лежит концепция сходства (или различия) между объектами, которая играет центральную роль в понимании окружающего мира. Как теоретическая конструкция, сходство распространено повсеместно и имеет широкие последствия в такой области, как категоризация [4]. В исследованиях достаточно часто возникают ситуации, требующие не просто представить, но и дать количественную оценку сходства между двумя элементами или большим набором элементов. Классические методы статистического анализа имеют методологические ограничения в объективной оценке сходства различающихся структур по признакам. Существует большой класс методов, разработанных для визуализации многомерных данных, что позволяет оценить их структуру и другие свойства, в том числе и латентные [5, с. 216].

Один из методов, который может быть использован для визуализации n-мерных данных, является многомерное масштабирование (Multidimensional Scaling, MDS) [6, с. 43]. MDS – это инструмент, который позволяет количественно оценивать суждения о сходстве. Формально MDS относится к набору статистических процедур, используемых для исследовательского анализа данных и уменьшения размерности, где в качестве входных данных используются оценки сходства между группами элементов [7]. Результатом MDS является визуализация, отображающая взаимосвязи между элементами в пространстве, когда похожие элементы расположены близко, а непохожие пропорционально удалены дальше друг от друга, что позволяет сделать вывод об организации признаков в пространстве [8]. Метод MDS ценен тем, что он сводит потенциально сложные наборы данных к основным параметрам, по которым объекты различаются, и тем, что он позволяет визуально оценить существующие взаимосвязи. Кроме того, оценивая расстояние между объектами, можно получить количественную оценку их воспринимаемого сходства относительно других объектов в пространстве [9].

Цель исследования: изучить сходство структурных элементов лучей кисти человека.

**Материал и методы исследования.** В данной работе использованы результаты морфометрии паспортизированных рентгенограмм кистей 200 человек (100 мужчин и 100 женщин) без костно-травматических изменений, костно-суставной патологии и деформаций из баз данных «Биометрическое описание рентгеноостеометрических признаков пястных костей кисти человека» и «Рентгеноостеометрические характеристики фаланг пальцев кисти человека» [10; 11]. Рентгеноостеометрические параметры включали длину, ширину оснований, тел и головок пястных костей и фаланг I–V пальцев, измеренные в мм (табл.).

Рентгеноостеометрические параметры пястных костей и фаланг пальцев

№	Параметр	Описание
1	Длина	Расстояние между центром суставной площадки основания и наиболее удалённой от него точкой на головке фаланги или пястной кости
2	Ширина основания	Расстояние между наиболее удалёнными одна от другой точками на локтевой и лучевой сторонах основания II–V пястных костей и фаланг II–V пальцев
3	Ширина тела	Расстояние между локтевой и лучевой сторонами тел II–V пястных костей, проксимальных и средних фаланг II–V пальцев
4	Ширина головки	Расстояние между наиболее удалёнными одна от другой точками на локтевой и лучевой сторонах головок II–V пястных костей и фаланг II–V пальцев

Средний возраст мужчин составил  $46,3 \pm 1,1$  года, средний возраст женщин –  $49,2 \pm 0,9$  года ( $M \pm m$ ). Статистический анализ, а также оценка и визуализации морфологического сходства между костными элементами лучей кисти проводились с помощью программного обеспечения R версии 4.2.1 с использованием пакета «MDS» [12, с. 361].

Анализ различий между двумя группами показателей выполнен при помощи параметрического критерия Student's t-test [5, с. 438]. Для оценки различий между несколькими группами показателей использован дисперсионный анализ, а в случае выявления достоверных различий между группами, при соответствующих значениях критерия Fisher's F, проводился анализ специфики различий с использованием Bonferroni Post Hoc Test [5, с. 496].

MDS проведён отдельно для рентгеноостеометрических показателей костей лучей кистей мужчин и женщин (мера близости – расстояние Евклида, размерность пространства – 2d). Учитывая количество показателей и меру близости между ними, на первом этапе вычисляется симметричная матрица для определения сходства показателей между собой. Затем при помощи алгоритмов «MDS» рассчитываются относительные координаты для каждого показателя в отдельности путём минимизации функции напряжений на основе итеративных методов сохранения метрики и создаётся конфигурация в многомерном пространстве, которая сохраняет, насколько это возможно, близость между попарными элементами в более высоком n-мерном пространстве и раскрывает базовую структуру данных.

Для оценки качества конфигурации рентгеноостеометрических показателей в пространстве использована диаграмма Shepard, как визуализация остатков и выбросов, возникающих в результате применения MDS к данным.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Пястные кости обладают выраженными половыми различиями: кости у мужчин в среднем длиннее на 1,95 мм, ширина оснований - на 1,9 мм, ширина тел - на 1,3 мм, ширина головок - на 2,2 мм больше, чем у женщин ( $t=2,2-10,48$ ,  $p<0,05$ ) (рис. 1).

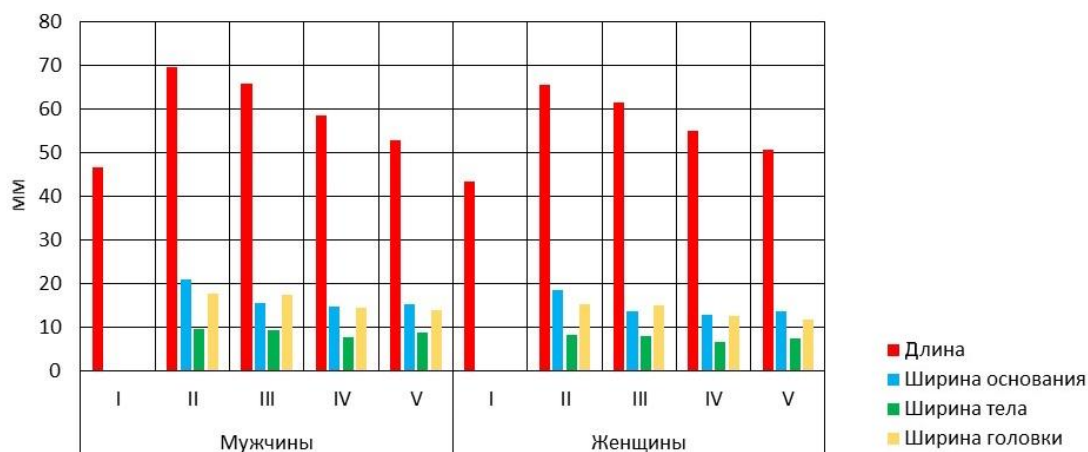


Рис. 1. Рентгеноостеометрические показатели пястных костей

Унилатеральные различия пястных костей характеризуются распределением по показателям длины –  $II>III>IV>V>I$ , ширине оснований –  $II>III=V>IV$ , ширине тел –  $II=III>V>IV$ , ширине головок –  $II=III>IV>V$  ( $F=442,94-1200,24$ ,  $p<0,05$ ).

Показателям проксимальных фаланг присуща высокая степень половой (фаланги у мужчин в среднем длиннее на 2,5 мм, ширина оснований на 1,6 мм, ширина тел на 1,3 мм, ширина головок на 1,2 мм больше, чем у женщин ( $t=1,99-22,05$ ,  $p<0,05$ )) и межпальцевой изменчивости (унилатеральная изменчивость характеризуется распределением по показателям длины –  $III>IV>II>V>I$ , ширине оснований –  $III>II>IV>V$ , ширине тел –  $III>II>IV>V$ , ширине головок –  $II=III>V>IV$  ( $F=522,4-761,69$ ,  $p<0,05$ )) (рис. 2а). Средние фаланги имеют как половые (фаланги у мужчин в среднем длиннее на 1,5 мм, ширина оснований на 1,1 мм, ширина тел на 0,9 мм, ширина головок на 0,2 мм больше, чем у женщин ( $t=2,41-12,99$ ,  $p<0,05$ )), так и межпальцевые особенности (унилатеральная изменчивость характеризуется распределением по показателям длины –  $III>IV>II>V$ , ширине оснований –  $III>II>IV>V$ , ширине тел –  $III>II>IV>V$ , ширине головок –  $III>II=IV>V$  ( $F=117,77-556$ ,  $p<0,05$ )) (рис. 2б). Дистальные фаланги обладают половыми (у мужчин фаланги в среднем длиннее на

1 мм, ширина оснований на 1,3 мм, ширина головок на 0,6 мм больше, чем у женщин ( $t=3,83-13,07, p<0,05$ ) и межпальцевыми различиями (унилатеральная изменчивость характеризуется распределением по показателям длины – III>IV>II>V, ширине оснований – III>II>IV>V, ширине тел – III>II>IV>V, ширине головок – III>II=IV>V ( $F=4,43-482,41, p<0,05$ )) (рис. 2в).

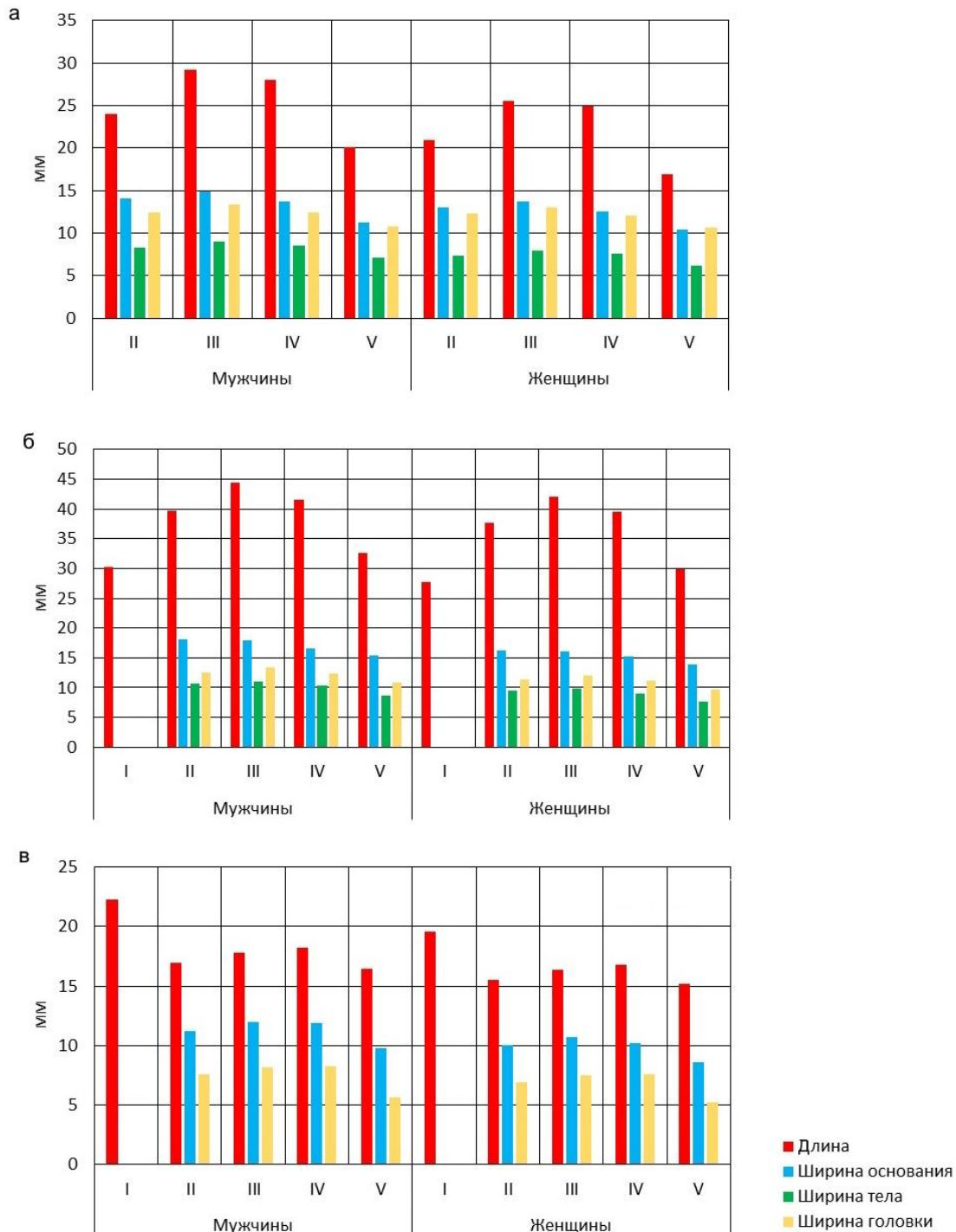


Рис. 2. Рентгеноостеометрические показатели проксимальных (а), средних (б) и дистальных (в) фаланг

Инфраструктура сходства между рентгеноостеометрическими показателями элементов лучей кисти отражается в их структуре, организация которой, независимо от пола,

демонстрирует градиент в композиционных отношениях между пястными костями и фалангами пальцев в пространстве MDS в виде двух групп: пястные кости/проксимальные фаланги и средние фаланги/дистальные фаланги, при этом средние и дистальные фаланги демонстрируют большее сходство, чем пястные кости и проксимальные фаланги (рис. 3).

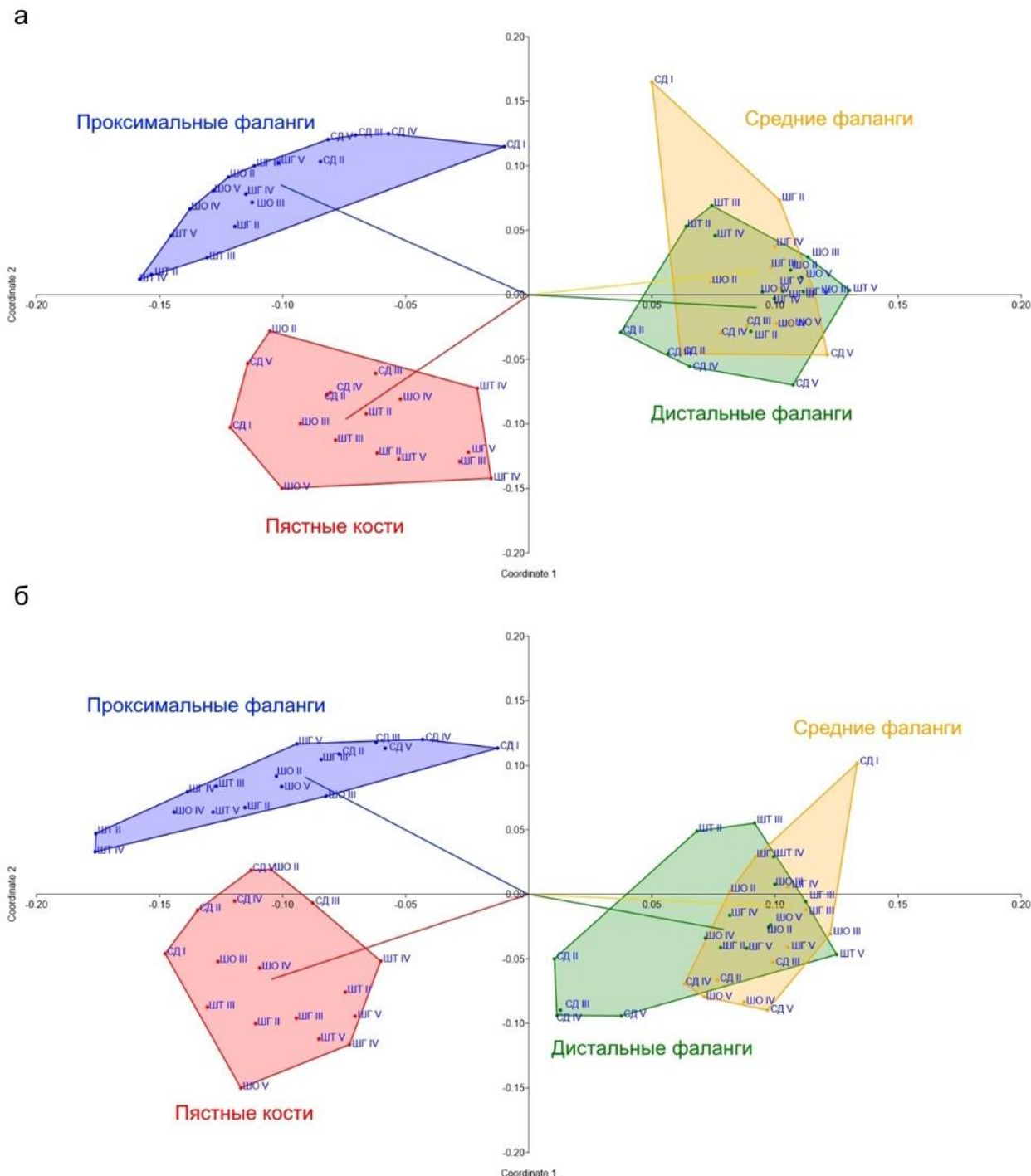
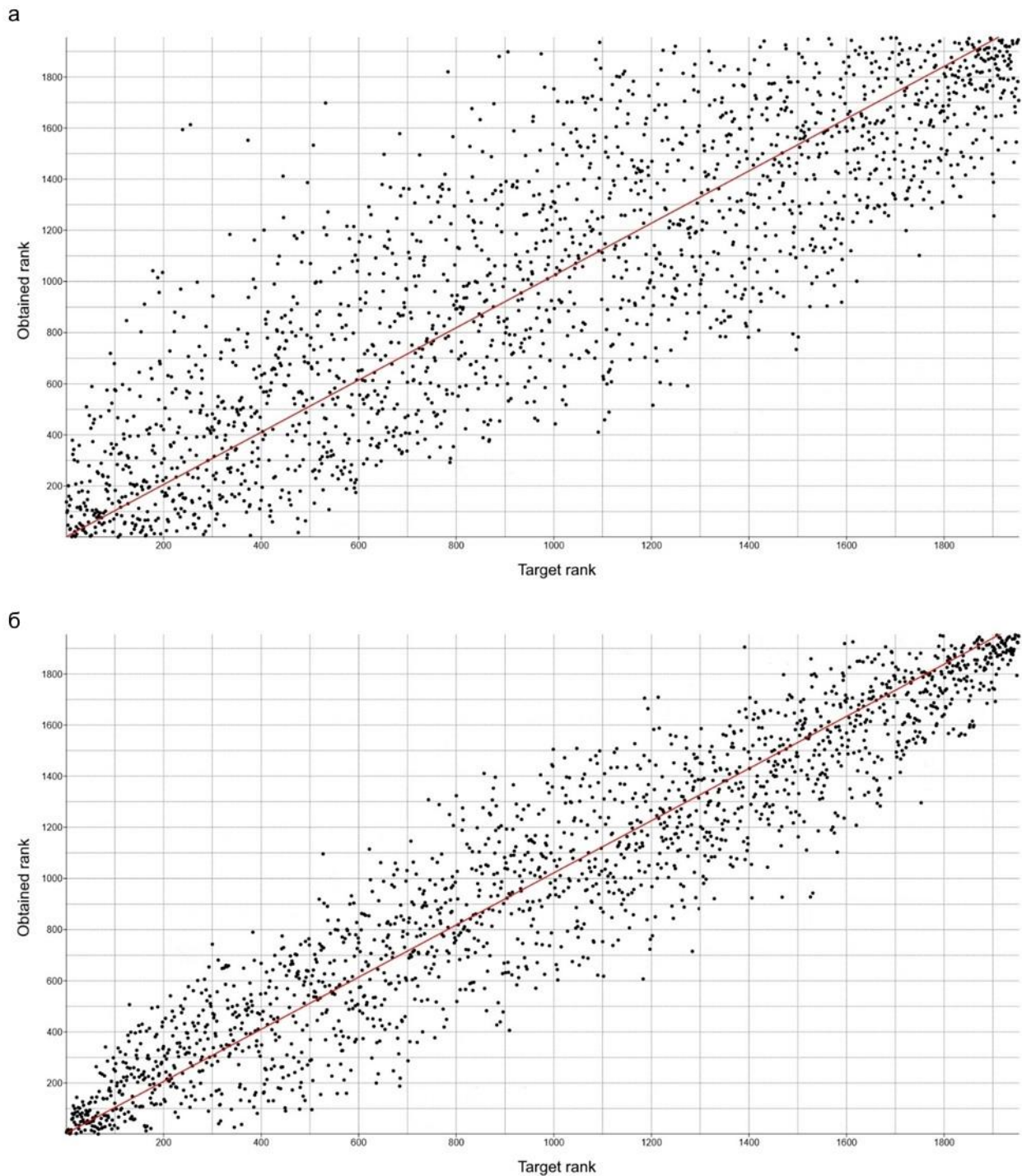


Рис. 3. Сходство между показателями сегментов лучей кистей мужчин (а) и женщин (б) в пространстве MDS

Зависимости полученных расстояний (Obtained rank) от исходных расстояний (Target rank) для оптимальной конфигурации рентгеноостеометрических показателей в пространстве MDS представлены на диаграммах Shepard (рис. 4).



*Рис. 4. Диаграммы Shepard для кистей мужчин (а) и женщин (б)*

Полученные модели конфигураций демонстрируют хорошее качество подгонки в пространстве MDS, о чём свидетельствуют низкие значения напряжения (stress), указывая на

лучшее соответствие между данными и их визуализацией ( $\text{stress}_{\text{мужчины}}=0,19$ ,  $\text{stress}_{\text{женщины}}=0,18$ ,  $R^2=0,32-0,54$ ,  $p<0,05$ ).

Таким образом, сравнительный анализ демонстрирует различия между рентгеноостеометрическими показателями костей *metapodium* и *acropodium*, изменчивость которых, независимо от пола, характеризуется проксимо-дистальным и радио-ульнарным градиентом, что согласуется с данными других авторов [2; 3]. В то же время ограниченные возможности классических статистических методов не позволяют оценить сходство в структуре лучей кисти [5, с. 417]. Метод MDS обеспечивает целостную картину сходства/различий между элементами лучей кисти путём преобразования попарных сравнений между пястными костями и фалангами пальцев в графическое представление, в котором расстояния между объектами являются показателями их сходства [13, с. 3].

Полученные с использованием MDS результаты свидетельствуют, что композиционные отношения между показателями пястных костей и фаланг пальцев являются латентными проявлениями структурной организации лучей кисти в виде анатомических модулей. Феномен структурной организации лучей кисти состоит в последовательном изменении конфигурации пястных костей и фаланг пальцев в пространственно-временном контексте, обуславливая эволюционные преобразования *autopodium* [14]. Большинство специалистов по эволюционной биологии сходятся во мнении, что более широкое использование орудий труда, чему способствовал переход ранних гоминид к двуногой походке, привело к функциональной адаптации *autopodium*, обусловленной формированием двух типов захватов: прецизионный и силовой, реализация которых обусловлена многоуровневой организацией *autopodium* [15].

**Заключение.** Результаты исследования позволяют предположить, что структурная организация сегментов лучей, независимо от пола, на основе линейных и нелинейных взаимосвязей морфометрических параметров пястных костей и фаланг пальцев обуславливает морфологическую интеграцию кисти человека.

### Список литературы

1. Panchal-Kildar S., Malone K. Skeletal anatomy of the hand // *Hand clinics*. 2013. Vol. 9. Is. 4. P. 459-471. DOI: 10.1016/j.hcl.2013.08.001.
2. Patel B.A., Maiolino S.A. Morphological diversity in the digital rays of primate hands. In: *Evolution of the primate hand: anatomical, developmental, functional, and paleontological evidence*. New York: Springer-Verlag, 2016. P. 55-100. DOI: 10.1007/978-1-4939-3646-5\_4.



3. Перепёлкин А.И., Краюшкин А.И., Доронин А.Б., Атрощенко Е.С., Краюшкин С.С. Аутоподиум человека (анатомия стопы и кисти). Волгоград: изд-во Волгоградского государственного медицинского университета, 2020. 136 с.
4. Serre T. Models of visual categorization. *Wiley interdisciplinary reviews // Cognitive science*. 2016. Vol. 7. Is. 3. P. 197-213. DOI: 10.1002/wcs.1385.
5. Michael J.S. *Statistical analysis handbook*. Edinburgh: Drumlin Security Ltd., 2018. 638 p.
6. Young F.W. *Multidimensional Scaling: History, Theory, and Applications*. 1st ed. New York: Psychology Press, 1987. P. 336.
7. Little A., Xie Y., Sun Q. An analysis of classical multidimensional scaling with applications to clustering // *Information and inference: a journal of the IMA*. 2022. Vol. 12. Is. 1. P. 72-112. DOI: 10.1093/imaiai/iaac004.
8. Dalmaijer E.S., Nord C.L., Astle D.E. Statistical power for cluster analysis // *BMC Bioinformatics*. 2022. Vol. 23. Is. 1. P. 205. DOI: 10.1186/s12859-022-04675-1.
9. Hout M.C., Papesh M.H., Goldinger S.D. Multidimensional scaling. *Wiley interdisciplinary reviews // Cognitive science*. 2013. Vol. 4. Is. 1. P. 93-103. DOI: 10.1002/wcs.1203.
10. Свидетельство о регистрации базы данных №2021621827. Биометрическое описание рентгеноостеометрических признаков пястных костей кисти человека / Ермоленко А.С. (RU). Заявка №2021621737; заявлено 11.08.2021; опубл. 31.08.2021, Бюл. 9.
11. Свидетельство о регистрации базы данных №2021622030. Рентгеноостеометрические характеристики фаланг пальцев кисти человека / Ермоленко А.С. (RU). Заявка №2021621927; заявлено 19.09.2021, опубл. 28.09.2021, Бюл. №10.
12. Hothorn T., Everitt B.S. *A Handbook of Statistical Analyses using R*. 3rd ed. New York: Chapman and Hall/CRC, 2014. 456 p. DOI: 10.1201/b17081.
13. Borg I., Groenen P.J.F. *Modern Multidimensional Scaling: Theory and Applications* (Springer Series in Statistics). 2nd ed. New York: Springer 2005. 636 p.
14. Almécija S., Smaers J.B., Jungers W.L. The evolution of human and ape hand proportions // *Nature communications*. 2015. Vol. 6. P. 7717. DOI: 10.1038/ncomms8717.
15. Yang B., Jiang L., Bao G., Yu H., Zhou X. Co-optimization of robotic design and skill inspired by human hand evolution // *Bioinspiration & biomimetics*. 2022. Vol. 18. Is. 1. DOI: 10.1088/1748-3190/ac884e.