

## ОРИГИНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Научная статья

УДК 611.717.9

doi:10.18499/2225-7357-2024-13-3-35-40

3.3.1 – анатомия человека



## Анализ структурной организации фаланг пальцев кисти человека с использованием анатомических сетевых моделей

А. С. Ермоленко<sup>1, 2</sup>✉<sup>1</sup>Ульяновский областной клинический центр специализированных видов медицинской помощи им. Е.М. Чучкалова, Ульяновск, Россия<sup>2</sup>Университет РЕАВИЗ, Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация.** Несмотря на то, что в настоящее время известны морфогенетические механизмы трансформации пальцев кисти человека в процессе онтогенеза, остается открытым вопрос о том, как они организованы в сложную интегрированную структуру дистального отдела кисти? Этот вопрос остается без ответа по нескольким причинам, в том числе из-за отсутствия консенсуса в отношении концептуальных определений и подходов, а также инструментов для оценки и сравнения вариаций нескольких анатомических частей кисти. **Цель исследования** – изучить структурную организацию фаланг пальцев кисти человека методом анатомического сетевого анализа (AnNA). **Материал и методы.** В данном исследовании для AnNA были использованы функции пакета IGRAPH в среде программирования для анализа данных R. Моделирование и компоновка сети выполнены с использованием алгоритма Fruchterman-Reingold. Анализ структуры, а также модульности и интеграции в сетях выполнен с использованием алгоритма spin-glass. Для исследования AnNA были использованы рентгеностеометрические показатели длины фаланг I–V пальцев 100 мужчин и 100 женщин среднего возраста без травматических изменений, деформаций и отклонений в развитии. **Результаты.** AnNA демонстрирует двухуровневую организацию дистального отдела кисти в виде проксимального модуля, включающего проксимальные фаланги и дистального модуля, объединяющего средние и дистальные фаланги. При сравнении характеристик сетевых моделей дистальных отделов кистей было обнаружено, что у женщин организация фаланг пальцев характеризуется более высокой морфологической интеграцией и модульностью (модульность 0,43), чем у мужчин (модульность 0,38). Морфологические модульность и интеграция являются организующими факторами структуры фаланг пальцев дистального отдела кисти у человека. **Заключение.** Результаты исследования демонстрируют, что структурная организация фаланг пальцев кисти человека представляет собой систему отдельных анатомических модулей фаланг.

**Ключевые слова:** кисть человека; пальцы; структурная организация; анатомический сетевой анализ

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Ермоленко А.С. Анализ структурной организации фаланг пальцев кисти человека с использованием анатомических сетевых моделей // Журнал анатомии и гистопатологии. 2024. Т. 13, №3. С. 35–40. <https://doi.org/10.18499/2225-7357-2024-13-3-35-40>

## ORIGINAL ARTICLES

Original article

## Analysis of the Structural Organization of the Human Finger Phalanges Using Anatomical Network Models

A. S. Ermolenko<sup>1, 2</sup>✉<sup>1</sup>Honored Doctor of Russia E.M. Chuchkalov Ulyanovsk Regional Clinical Center for Specialized Types of Medical Care, Ulyanovsk, Russia<sup>2</sup>Private University REAVIZ, Saint Petersburg, Russia

**Abstract.** Despite the fact that the morphogenetic mechanisms of human finger transformation during ontogenesis are currently known, the issues of how they are organized into a complex integrated structure of the distal hand remains open. This question remains unanswered for several reasons, including the lack of consensus on conceptual definitions and approaches, as well as tools for assessing and comparing variations in several anatomical parts of the hand. **The aim** of the study was to investigate the structural organization of the human finger phalanges using anatomical network analysis (AnNA). **Material and methods.** In this study, the authors applied the IGRAPH package functions in the R data analysis programming environment for AnNA. Network modeling and layout were performed using the Fruchterman-Reingold algorithm. Analysis of the structure, as well as modularity and integration in the networks, was performed using the spin-glass algorithm. X-ray

osteometric indices of the I–V fingers phalanx length were used to assess AnNA in 100 men and 100 women of the middle age without traumatic changes, deformations, and developmental deviations. **Results.** AnNA demonstrates a two-level organization of the distal hand in the form of a proximal module including the proximal phalanges and a distal module combining the middle and distal phalanges. When comparing the features of the network models of the distal hand, it was found that in women, the organization of the finger phalanges is characterised by higher morphological integration and modularity (modularity 0.43) than in men (modularity 0.38). Morphological modularity and integration are organizing factors in the structure of the finger phalanges of the human distal hand. **Conclusion.** The study results demonstrate that the structural organization of the finger phalanges of the human hand is a system of individual anatomical modules of the phalanges.

**Keywords:** human hand; fingers; structural organization; anatomical network analysis

**Conflict of interests:** the author declares no conflict of interests.

**For citation:** Ermolenko A.S. Analysis of the structural organization of the human finger phalanges using anatomical network models. *Journal of Anatomy and Histopathology*. 2024. V. 13, №3. P. 35–40. <https://doi.org/10.18499/2225-7357-2024-13-3-35-40>

## Введение

Среди всех звеньев добавочного скелета кисть человека обладает самым сложным строением, что обусловлено наличием в ее структуре 27 костей, 14 из которых являются фалангами I–V пальцев, образуя дистальный отдел кисти, являющийся наиболее важным в функциональном контексте, наделяя последнюю возможность реализации функции прецизионного захвата [2].

Эмбриональное развитие пальцев является тесно взаимосвязанным из-за общего происхождения и смежного анатомического расположения, что проявляется в однотипности их строения [12]. С эволюционной точки зрения изменение типа локомоции, обусловленное добыванием пищи и поведенческими навыками ранних гоминид, привело к развитию прецизионного захвата, связанного с модификацией пальцев кисти [10]. В настоящее время известно, что сегменты добавочного скелета человека с точки зрения структурной организации представляют собой совокупность морфологических модулей с разной степенью интеграции между ними [7, 18].

Представления о структурной организации добавочного скелета остаются несколько ограниченными из-за сложности изучения многочисленных взаимодействий между костями различных его отделов [4]. Более того, в немалой степени из-за сложности анализа наборов данных и их понимания, большинство исследований было сосредоточено на скелете пояса и свободной части верхних и нижних конечностей, за исключением дистальных сегментов [5]. Изучение строения дистального отдела (фаланг пальцев) кисти человека требует новой методологии, основанной на выявлении и анализе структурной организации, позволяющей получить новые представления об особенностях строения дистальных сегментов верхних конечностей.

Одним из новых прогрессивных инструментов для изучения организации и закономерностей взаимосвязей между частями анатомической структуры является анатомический сетевой анализ (Anatomical network analysis, AnNA), уникальной особенностью которого в отличие от классической морфо-

метрии является возможность непосредственно сравнивать различные части исследуемого объекта между собой [12, 18]. Оценка паттернов связности в AnNA основана на инструментах и статистике, заимствованных из теории сетей, формализуя части изучаемого объекта в виде узлов и связей между ними, интегрированных в сетевую модель, для оценки организации анатомической структуры [15]. Примечательно, что AnNA представляет собой формальную основу для изучения морфологической организации, свободную от априорных предположений и гипотез о развитии, функциональных и филогенетических взаимоотношениях между частями анатомических структур [8].

Цель исследования – изучить структурную организацию фаланг пальцев кисти человека с использованием анатомического сетевого анализа.

## Материал и методы исследования

В данной работе использовали результаты морфометрии рентгенограмм кистей 200 человек (100 мужчин и 100 женщин) из базы данных «Рентгеностеометрические характеристики фаланг пальцев кисти человека» [1]. Средний возраст мужчин составил  $46,3 \pm 1,1$  года, а женщин –  $49,2 \pm 0,9$  года.

Исследование одобрено локальным этическим комитетом Университета РЕАВИЗ (протокол №2/21 от 21.06.2021 г.).

Для анализа были использованы показатели длины (расстояние между центром суставной области основания и наиболее удаленной от него точкой на головке кости в мм) фаланг I–V пальцев кисти. Анатомические сети были смоделированы как системы связей между узлами, информация о которых закодирована в виде матриц смежности парных коэффициентов корреляции: квадратной симметричной матрицы, где каждая строка и столбец представляют одну анатомическую часть. Связи между фалангами пальцев были определены на основе двух типов соединений: при первом типе связи соединение между фалангами обусловлено расположением (проксимальные фаланги, средние фаланги, дистальные фаланги), при втором типе связей

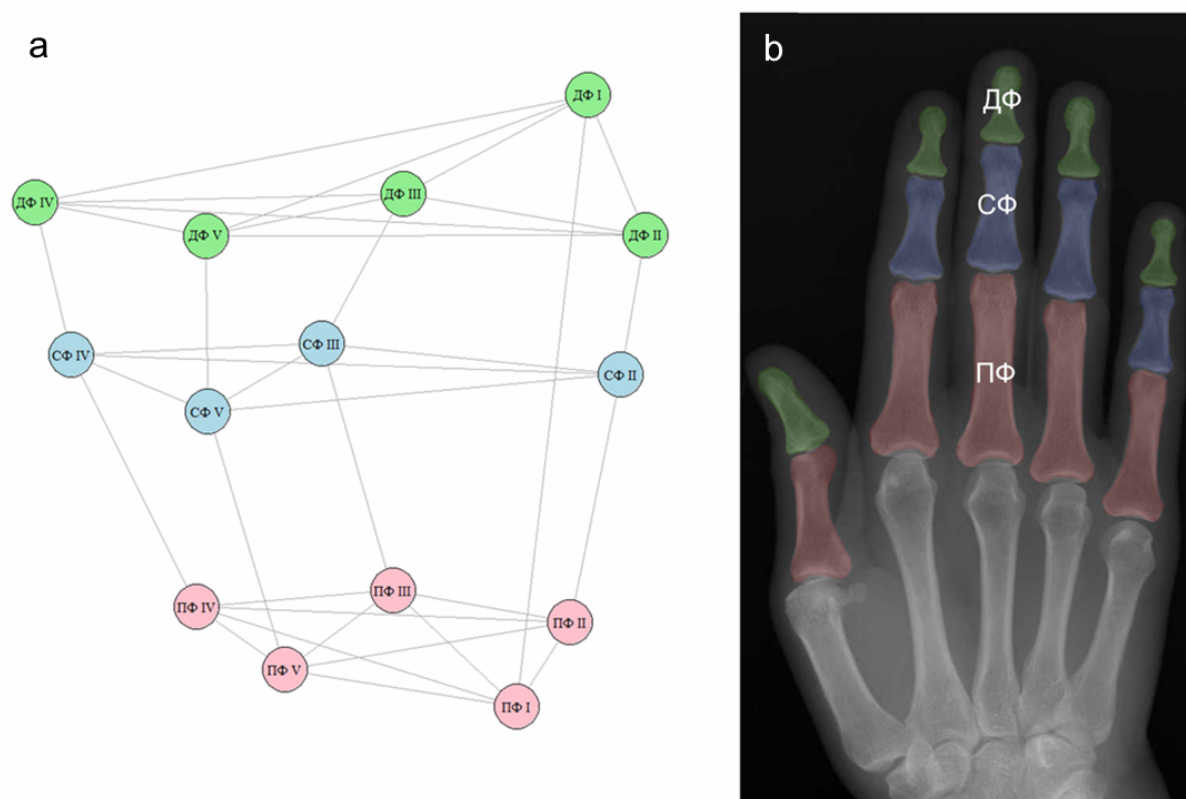


Рис. 1. Схема анатомической сетевой модели (а) и отображение фаланг пальцев рентгенограмме кисти (б). ПФ – проксимальные фаланги, СФ – средние фаланги, ДФ – дистальные фаланги.  
Fig. 1. The scheme of the anatomical network model (a) and the X-ray image of the finger phalanges of the hand (b). PP – proximal phalanges, MP – middle phalanges, DP – distal phalanges.

соединение между фалангами обусловлено наличием связи посредством межфалангового сустава. В настоящем исследовании была создана сетевая модель, которая включала 14 узлов (5 для проксимальных фаланг, 4 для средних фаланг и 5 для дистальных фаланг) (рис. 1).

Мерой количественной оценки связи между узлами был вес связи. Узлы расположены с использованием алгоритма Fruchterman–Reingold. Для определения модульности в анатомических сетях был использован алгоритм spin-glass, реализация которого основана на парных взаимодействиях в системе, основанных на предположении, что соединения между узлами находятся в сходных состояниях – ребра между узлами направлены друг к другу, формируя единственно возможную оптимальную подсеть, что определяет морфологический контекст модульности [17]. В этом исследовании для построения сети были использованы функции пакета IGRAPH в среде программирования для анализа данных R (programming language) v. 4.3.1 (free software) [6]. Количественная оценка основных параметров сети (сетевая или графовая метрика, основанная на коэффициенте корреляции Пирсона) включала: плотность соединений (количество существующих соединений относительно общего максимально возможного в соответствии с общим количеством узлов), средний коэффициент класте-

ризации (среднее арифметическое значение коэффициента кластеризации всех узлов в сети), среднее расстояние между узлами (среднее значение суммы расстояний между двумя узлами сети), модульность (значение, указывающее, насколько хорошо части сети (модули) отделены друг от друга), неоднородность соединений (отношение между стандартным отклонением и средним значением соединений).

Перед проведением статистического анализа количественных данных была выполнена оценка распределения выборки на предмет соответствия закону нормального распределения (Shapiro-Wilk W Test). Анализ различий между двумя группами количественных переменных выполнен с использованием Student's t-test (уровень статистической значимости  $p < 0,05$ ) в программе Statistica 13 (StatSoft Inc., USA).

### Результаты и их обсуждение

Были проанализированы анатомические сети, представляющие дистальные отделы (фаланги пальцев) кистей мужчин и женщин, состоящие из 14 узлов и 35 ребер или соединений (рис. 2).

Анализ взаимосвязи между узлами внутри модуля и между узлами модулей каждого модуля, независимо от пола и стороны тела продемонстрировал отсутствие группи-

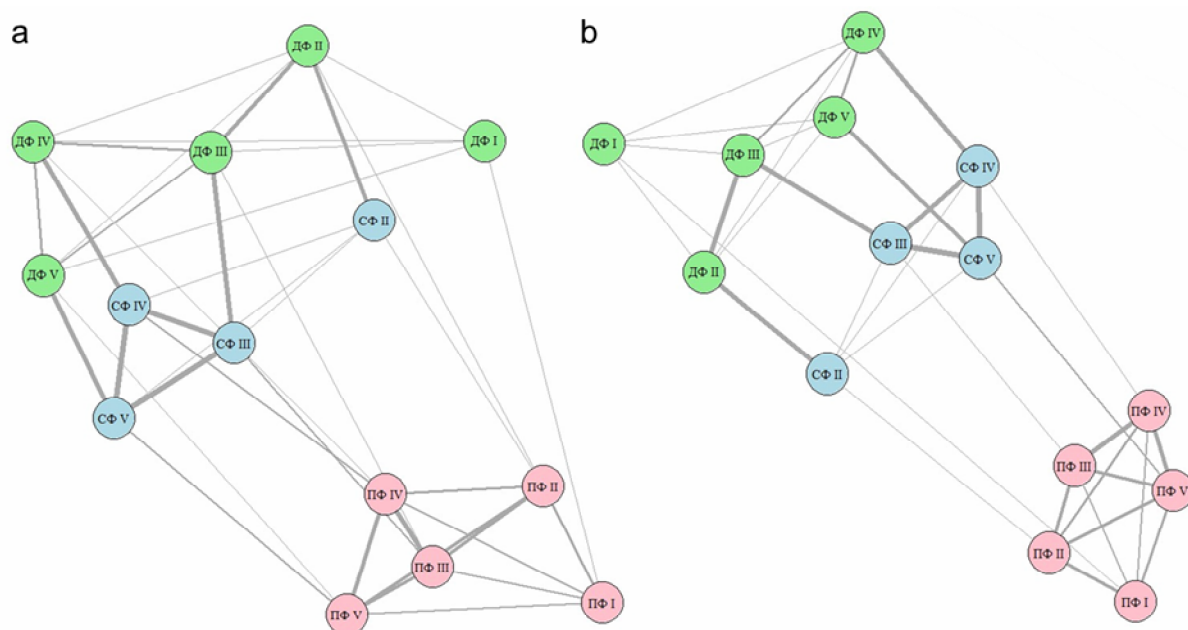


Рис. 2. Сетевые модели дистальных отделов кистей мужчин (а) и женщин (б). ПФ – проксимальные фаланги, СФ – средние фаланги, ДФ – дистальные фаланги. Толщина линий между узлами отражает вес связи.

Fig. 2. Network models of the distal parts of the hands in men (a) and women (b). PP – proximal phalanges, MP – middle phalanges, DP – distal phalanges. The thickness of the lines between the nodes reflects the connection weight.

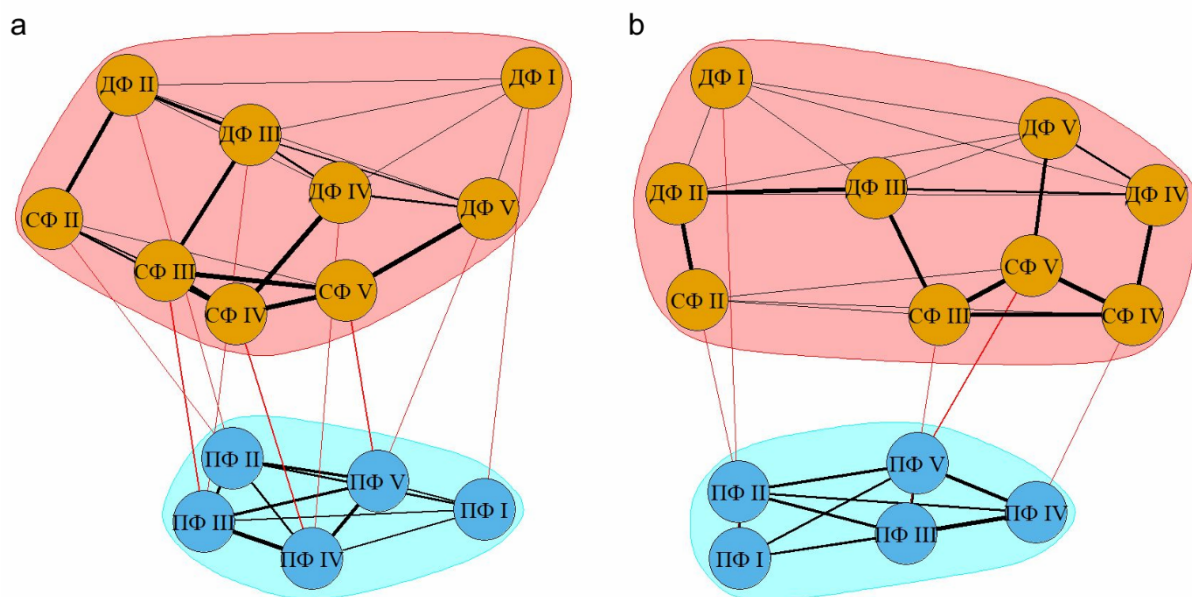


Рис. 3. Визуализация структуры дистального отдела кистей мужчин (а) и женщин (б). Проксимальный модуль выделен голубым цветом, дистальный модуль выделен розовым цветом. Толщина линий между узлами отражает вес связи. ПФ – проксимальные фаланги, СФ – средние фаланги, ДФ – дистальные фаланги.

Fig. 3. Visualisation of the structure of the distal part of the hands in men (a) and women (b). The proximal module is highlighted in blue, the distal module is highlighted in pink. The thickness of the lines between the nodes reflects the connection weight. PP – proximal phalanges, MP – middle phalanges, DP – distal phalanges.

ровки внутри каждого модуля, что позволило в итоге выделить два модуля. Модуль 1 (проксимальный) включал проксимальные фаланги I–V пальцев. Модуль 2 (дистальный) включал средние фаланги II–V пальцев и дистальные фаланги I–V пальцев (рис. 3). Название каждого модуля относится только к анатомической области, которую он занимает, и ис-

ключает любую интерпретацию, связанную с его развитием и функционированием.

Анализ сетевых моделей дистальных отделов кистей показал, что основанная на весе связи между пястными костями, а также между средними и дистальными фалангами морфологическая интеграция более высокая, что обуславливает морфологическую модуль-

Таблица 1 / Table 1

**Параметры анатомических сетевых моделей дистального отдела кисти**  
**Parameters of anatomical network models of the distal part of the hand**

Параметр	Мужчины, M±SD	Женщины, M±SD	t-критерий	p
Плотность соединений	0,22±0,08	0,35±0,08	4,91	0,03
Коэффициент кластеризации	0,39±0,05	0,43±0,06	3,82	0,02
Среднее расстояние между узлами	0,52±0,07	0,55±0,07	1,86	0,12
Модульность	0,38±0,08	0,43±0,08	3,81	0,03
Неоднородность соединений	0,8±0,06	0,65±0,07	4,93	0,01

ность. Несмотря на одинаковую структурную организацию фаланг пальцев при одинаковом среднем расстоянии между узлами сети наблюдались половые различия в сетевых моделях – у женщин, в отличие от мужчин анатомические сети обладали большей однородностью. Значения плотности соединений между узлами сети и коэффициента кластеризации свидетельствовали о более выраженной морфологической интеграции у женщин, что в свою очередь обуславливает степень морфологической модульности (табл. 1).

Данная работа является первым исследованием с использованием анатомического сетевого анализа для оценки структурной организации фаланг пальцев кисти. Результаты данного исследования демонстрируют возможности AnNA для изучения структурной организации кисти человека и, в частности, ее дистального отдела – *acropodium*. В предыдущих исследованиях было показано, что структурная организация кисти у приматов, в том числе и человека лежит в плоскости различий между морфометрическими параметрами фаланг пальцев, выявленных с помощью классической морфометрии, что проявляется в различных пропорциональных соотношениях между последними [13].

Результаты настоящего исследования демонстрируют, что дистальный отдел кисти обладает неоднородной структурной организацией, что возможно обусловлено модификационной изменчивостью в ходе ее эволюции [3]. Процессы развития и роста фаланг пальцев кисти у приматов, в том числе и человека детерминируются кластерными Нохгенами и являются синхронными [14, 16]. Однако, возможная гетерохрония в проксимодистальном паттерне формирует двухуровневую структурную организацию фаланг пальцев кисти у человека, обусловленную возможно различной пролиферативной активностью мезодермальных клеток в области дистальной части зачатка кисти [11, 12].

Несмотря на то, что пястные кости и фаланги пальцев являются тесно связанными модулями кисти, полученные результаты подтверждают гипотезу о градиенте интеграции в добавочном скелете [3]. Развитие, рост и дифференцировка скелета кисти обусловлены генетически и происходят одновременно в трех плоскостях в виде непрерывного процесса. Эти скоординированные процессы разви-

тия обеспечивают интеграцию фаланг пальцев кисти [9]. Таким образом, развитие структур проксимального модуля (проксимальные фаланги) и дистального модуля (средние и дистальные фаланги) регулируется совместно, что приводит к высоко скоординированным анатомическим и функциональным взаимосвязям. Более прочные взаимосвязи между элементами каждого из анатомических модулей кисти согласуются с ее морфогенезом относительно радиолатеральной (поперечной) оси, что обусловлено высокой пролиферативной активностью мезодермальных клеток, образующих зону поляризующей активности, расположенную постаксиально на самой дистальной части зачатка кисти [12]. В некоторых исследованиях AnNA использовался для сравнительной оценки, моделирования развития, функционирования и эволюции различных сегментов добавочного скелета [8, 18]. Однако исследования кисти человека при помощи AnNA были сосредоточены на изучении взаимосвязи костных структур с сухожилиями и мышцами, в то время как структурная организация не рассматривалась в контексте органической целостности. Выделение двухуровневой структуры в организации дистального отдела кисти в виде проксимального и дистального морфологических модулей, возможно, раскрывает эволюционный аспект трансформации пальцев для силового захвата, в котором участвуют проксимальные фаланги и прецизионного манипулирования предметами, в котором участвуют средние и дистальные фаланги [10]. Полученные результаты нельзя рассматривать в контексте существования взаимосвязи между модульностью и сложным строением дистального отдела кисти с морфологической точки зрения. В то же время попытки ограничить определение сложностью строения кисти подтверждают положительную обратную связь между модульностью и структурой, однако к этому тезису следует относиться с некоторой осторожностью из-за небольшого количества фаланг пальцев кисти у человека.

### Заключение

Таким образом, использование сетевых моделей в рамках изучения структурной организации фаланг пальцев кисти позволило выделить два модуля: проксимальный,

включающий проксимальные фаланги и дистальный, включающий средние и дистальные фаланги. Результаты проведенного исследования демонстрируют, что определяющими факторами структурной организации пальцев кисти являются морфологическая интеграция и модульность. Полученные результаты дают новые знания о структурной организации сложных анатомических объектов с позиции теории сетей.

### Список источников / References

1. Ермоленко А.С. Свидетельство РФ о государственной регистрации базы данных №2021622030; 2021. Ermolenko AS Svidetel'stvo RF o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh №2021622030; 2021 (In Russ.).
2. Перепелкин А.И., Краюшкин А.И., Доронин А.Б., и др. Аутоподиум человека (анатомия стопы и кисти). Волгоград: изд-во ВолГМУ; 2020. 135. Perepelkin AI, Krayushkin AI, Doronin AB, i dr. Autopodium cheloveka (anatomya stopy i kisti). Volgograd: izd-vo VolGGMU; 2020. 135 (In Russ.).
3. Chavez T.J., Morrell N.T. The Evolution of the Human Hand From an Anthropologic Perspective. *The Journal of hand surgery.* 2022; 47(2):181–185. DOI: 10.1016/j.jhsa.2021.07.006
4. Conaway M.A., Adams D.C. An effect size for comparing the strength of morphological integration across studies. *Evolution.* 2022; 76(10):2244–2259.
5. Conaway M.A., von Cramon-Taubadel N. Morphological integration of the hominoid postcranium. *Journal of human evolution.* 2022; 171:103239. DOI: 10.1016/j.jhevol.2022.103239
6. Csardi G., Nepusz T. The igraph software package for complex network research. *International Journal of complex systems.* 2006; 1695(5):1–9. URL: [http://www.interjournal.org/manuscript\\_abstract.php?361100992](http://www.interjournal.org/manuscript_abstract.php?361100992)
7. Diogo R, Esteve-Altava B, Smith C et al. Anatomical Network Comparison of Human Upper and Lower, Newborn and Adult, and Normal and Abnormal Limbs, with Notes on Development, Pathology and Limb Serial Homology vs Homoplasy. *PLoS One.* 2015; 10(10):e0140030. DOI: 10.1371/journal.pone.0140030
8. Diogo R., Molnar J.L., Rolian C., Esteve-Altava B. First anatomical network analysis of fore- and hindlimb musculoskeletal modularity in bonobos, common chimpanzees, and humans. *Scientific reports.* 2018; 8(1):6885. DOI: 10.1038/s41598-018-25262-6
9. Glover J.D., Sudderick Z.R., Shih B.B., et al. The developmental basis of fingerprint pattern formation and variation. *Cell.* 2023, 186(5):940–956.e20. DOI: 10.1016/j.cell.2023.01.015
10. Jaworski T., Karpiński R., Dobrowolska A. Biomechanics of the upper limb. *Journal of Technology and Exploitation in Mechanical Engineering.* 2016; 2(1):56–59. DOI: 10.35784/jteme.517
11. Li J., Glover J.D., Zhang H., Peng M, et al. Limb development genes underlie variation in human fingerprint patterns. *Cell.* 2022; 185(1):95–112.e18. DOI: 10.1016/j.cell.2021.12.008
12. McQueen C., Towers M. Establishing the pattern of the vertebrate limb. *Development.* 2020; 147(17):dev177956. DOI: 10.1242/dev.177956
13. Patel B.A., Maiolino S.A. Morphological Diversity in the Digital Rays of Primate Hands. In: T. Kivell, P. Lemelin, B. Richmond, D. Schmitt (eds.). *The Evolution of the Primate Hand. Developments in Primatology: Progress and Prospects.* New York: Springer; 2016: 55–100. DOI: 10.1007/978-1-4939-3646-5\_4
14. Petit F., Sears K.E., Ahituv N. Limb development: a paradigm of gene regulation. *Nature reviews. Genetics.* 2017; 18(4):245–258. DOI: 10.1038/nrg.2016.167
15. Rasskin-Gutman D., Esteve-Altava B. Connecting the dots: anatomical network analysis in morphological EvoDevo. *Biological Theory.* 2014; 9(2):178–193. DOI: 10.1007/s13752-014-0175-x
16. Saxena A., Cooper K.L. Diversification of the vertebrate limb: sequencing the events. *Current opinion in genetics & development.* 2021; 69:42–47. DOI: 10.1016/j.gde.2021.02.005
17. Yang Z., Algesheimer R., Tessone C.J. A Comparative Analysis of Community Detection Algorithms on Artificial Networks. *Scientific reports.* 2016; 6:30750. DOI: 10.1038/srep30750
18. Ziermann J.M., Boughner J.C., Esteve-Altava B., Diogo R. Anatomical comparison across heads, fore- and hindlimbs in mammals using network models. *Journal of anatomy.* 2021; 239(1):12–31. DOI: 10.1111/joa.13409

### Информация об авторах

✉Ермоленко Александр Сергеевич – канд. мед. наук, врач травматолог-ортопед Ульяновского областного клинического центра специализированных видов медицинской помощи им. засл. врача России Е.М. Чучкалова; ул. Корякина, 28, Ульяновск, 432063, Россия; [osteon@yandex.ru](mailto:osteon@yandex.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-2163-7911>  
SPIN 7182-6029

### Information about the authors

✉Aleksandr S. Ermolenko – Cand. Sci. (Med.), traumatologist-orthopedist of Honored Doctor of Russia E.M. Chuchkalov Ulyanovsk Regional Clinical Center for Specialized Types of Medical Care; ul. Koryukina, 28, Ulyanovsk, 432063, Russia [osteon@yandex.ru](mailto:osteon@yandex.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-2163-7911>  
SPIN 7182-6029

Статья поступила в редакцию 8.06.2024; одобрена после рецензирования 12.08.2024; принята к публикации 16.09.2024.  
Submitted 8.06.2024; Revised 12.08.2024; Accepted 16.09.2024.