

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ФОРМЫ ПЯСТИ ЧЕЛОВЕКА ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОГРАФИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Ермоленко А.С.^{1,2}

¹ГУЗ «Ульяновский областной клинический центр специализированных видов медицинской помощи им. Заслуженного врача России Е.М. Чучкалова», Ульяновск, e-mail: osteon@yandex.ru;

²Университет РЕАВИЗ, Санкт-Петербург

Цель исследования – изучить изменчивость формы пясти у человека в зависимости от морфологического типа кисти с применением геометрических морфометрических методов. В исследовании были использованы цифровые изображения рентгенограмм правых кистей 50 мужчин и 50 женщин. Геометрическая морфометрия включала анализ конфигураций форм пястей, описываемых декартовыми координатами 8 ориентиров. Каждая кисть была визуально разделена на три типа в зависимости от относительной длины указательного и безымянного пальцев: ульнарный (указательный палец короче безымянного), радиальный (указательный палец длиннее безымянного) и неопределенный (указательный и безымянный пальцы равны). Изменения формы пясти как в продольной, так и в поперечной оси связаны с морфологическим типом кисти и обусловлены одновременными разнонаправленными проксимодистальными и радиоульнарными трансформациями, связанными с положением оснований и головок пястных костей. Пясти кистей ульнарного типа – широкие и короткие (форма близка к квадратной), пясти кистей радиального типа – узкие и удлиненные (форма близка к прямоугольной). Независимо от пола более выраженные различия установлены между формами пястей кистей ульнарного и радиального типов, в меньшей степени различаются формы пястей кистей радиального и неопределенного, а также ульнарного и неопределенного типов. Выявлена слабая зависимость формы пясти от ее размера. Полученные результаты демонстрируют возможности геометрических морфометрических методов для изучения форм пясти у человека и их вариаций в зависимости от морфологического типа кисти.

Ключевые слова: пясть человека, форма, аллометрия, геометрическая морфометрия, рентгенография.

VARIABILITY OF THE SHAPE OF THE HUMAN METACARPUS ACCORDING TO X-RAY DATA USING GEOMETRIC MORPHOMETRIC METHODS

Ermolenko A.S.

¹Doctor Chuchkalov Ulyanovsk Regional Clinical Center of Specialized Types of Medical Care, Ulyanovsk; e-mail: osteon@yandex.ru;

²Private University REAVIZ, Saint Petersburg

The aim of the to study the variability of the shape of the pastern in humans depending on the morphological type of the hand using geometric morphometric methods. The study used digital X-ray images of the right hands of 50 men and 50 women. Geometric morphometry included the analysis of the configurations of the shapes of the metacarpus described by the Cartesian coordinates of 8 landmarks. Each hand was visually divided into three types depending on the relative length of the index and ring fingers: ulnar (index finger is shorter than the ring finger), radial (index finger is longer than the ring finger) and indefinite (index and ring fingers are equal). Changes in the shape of the metacarpus in both the longitudinal and transverse axes are associated with the morphological type of the hand and are caused by simultaneous multidirectional proximodistal and radioulnar transformations associated with the position of the bases and heads of the metacarpal bones. The metacarpus of the ulnar type are wide and short (the shape is close to square), the metacarpus of the radial type are narrow and elongated (the shape is close to rectangular). Regardless of gender, more pronounced differences have been established between the shapes of the metacarpus of the ulnar and radial types, the shapes of the metacarpus of the radial and indefinite, as well as the ulnar and indefinite types, differ to a lesser extent. A weak dependence of the shape of the metacarpus on its size was revealed. The results obtained demonstrate the possibilities of geometric morphometric methods for studying the shapes of the metacarpus in humans and their variations depending on the morphological type of the hand.

Keywords: human metacarpus, shape, allometry, geometric morphometry, radiography.

Введение

Способность к захвату наблюдается у многих видов животных, но наиболее развита у человека и характеризуется качеством противодействия, позволяющим ладони кисти приспосабливаться к форме предмета, что обусловлено архитектурой пясти [1]. Пясть у человека образована пятью короткими трубчатыми костями, расположенными относительно друг друга по дуге. Соотношение длин пястных костей у человека соответствует метакарпальной формуле большинства приматов ($II > III > IV > V > I$), однако у человека IV и V пястные кости в процессе онтогенеза несколько отстают в развитии, что усиливает радиализацию кисти [2]. В зависимости от пропорциональных соотношений морфометрических показателей пястных костей выделяют три типа кисти: длинные и узкие (stenocheiric), короткие и широкие (eurycheiric), промежуточные (mesocheiric) [3].

В настоящее время для оценки формы пясти используются антропометрия, а также морфометрия по данным рентгенографии [4]. Однако классическая антропометрия имеет ряд недостатков из-за разного индекса мягких тканей у мужчин и женщин, а также погрешностей измерений [5]. В текущий период оценка формы пясти по данным рентгенографии базируется на анализе пропорциональных соотношений между длиной и шириной этого отдела кисти. Изменения формы пясти являются недооцененными из-за концептуальных трудностей в количественной оценке такого абстрактного понятия, как форма. Попытки описать форму пясти на основе данных, полученных с помощью классических морфометрических методов, носят косвенный характер – отсутствует анализ формы как таковой. Классическая антропометрия, базирующаяся на линейных измерениях, не позволяет объективно оценить пространственные морфологические изменения и геометрию изучаемого объекта [6]. С учетом анатомической изменчивости пясти, наблюдавшейся в предыдущих исследованиях, возникает вопрос о целесообразности более детального анализа вариаций формы данного отдела кисти с использованием методов, основанных на геометрической морфометрии, в которой информация получена из декартовых координат ориентиров, расположенных в определенных точках изучаемого объекта [7]. Определение этих ориентиров позволяет провести тщательную количественную оценку морфологических изменений и четко визуализировать различия между сложными формами, которые в противном случае было бы трудно отличить [8].

Цель исследования – изучить изменчивость формы пясти у человека в зависимости от морфологического типа кисти с использованием геометрических морфометрических методов.

Материал и методы исследования. Методология, используемая в этом исследовании, – это двумерная геометрическая морфометрия, которая определяется как статистический анализ размера и формы объекта в виртуальном пространстве [9].

Объектом исследования являлись цифровые DICOM-изображения рентгенограмм правых кистей 50 мужчин (средний возраст $46,3 \pm 1,1$ года) и 50 женщины (средний возраст $49,2 \pm 0,9$ года) из архива отделения лучевой диагностики ГУЗ «Ульяновский областной клинический центр специализированных видов медицинской помощи им. Заслуженного врача России Е.М. Чучкалова». Критерии включения в исследование: отсутствие травматических изменений, аномалий развития и костно-суставной патологии. Исследование одобрено локальным этическим комитетом Университета РЕАВИЗ (протокол № 2/21 от 21.06.2021 г.). В зависимости от соотношения длин указательного (2d) и безымянного (4d) пальцев кисти были классифицированы на ульнарные (U, $2d < 4d$), радиальные (R, $2d > 4d$) и неопределенные (N, $2d = 4d$) [10]. Для снижения вероятности ошибки все процедуры выполнены одним исследователем. Цифровые изображения рентгенограмм были отредактированы таким образом, чтобы середины пястно-фаланговых суставов среднего пальца на каждом изображении совпадали. При помощи экранного дигитайзера TrpDig2 v. 2.3 в декартовой системе координат на каждом цифровом изображении рентгенограммы кисти были идентифицированы 8 ориентиров и получены их двумерные координаты (рис 1.) [11].

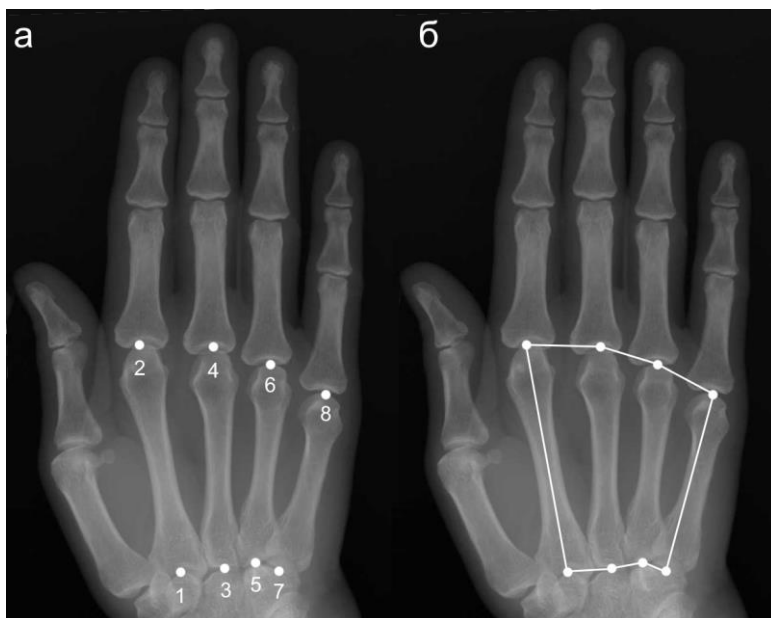


Рис. 1. Расположение (а) и визуализация конфигурации (б) ориентиров

Анализ форм пястей был проведен с использованием MorphoJ 1.07a [12]. Декартовы координаты ориентиров конфигураций пястей были подвергнуты обобщенному Прокрустову выравниванию для удаления любых элементов, не относящихся к форме (положение,

ориентация и масштаб), и оптимального выравнивания в пространстве. Для визуализации многомерных различий формы пясти относительно средней конфигурации в двумерном пространстве проведен анализ главных компонент (principal components analysis, PCA) на основе ковариационной матрицы прокрустовых координат путем получения оценок главных компонент (PC), а также для демонстрации экстремальных конфигураций форм (масштабный коэффициент=0,1 прокрустовых единиц). Оценка различий форм пястей между заранее определенными тремя группами кистей различных морфологических типов, основанная на расстояниях Mahalanobis (мера расстояния между векторами случайных величин), выполнена с использованием канонического вариационного анализа (canonical variate analysis, CVA). Для оценки аллометрии (зависимость формы от размера) применена многомерная регрессия, где в качестве независимой переменной размера использован центроидный размер (centroid size, CS – квадратный корень суммы квадратов расстояний всех точек фигуры от ее центроида или геометрического центра), в качестве зависимой переменной формы использованы прокрустовы координаты [13].

Результаты исследования и их обсуждение. На первые две главные компоненты (PC) приходится более половины вариаций формы (PC1=38,8%, PC2=16,1%) пясти. Вдоль оси первой главной компоненты (PC1) форма пясти расширяется (PC1-) или сужается (PC1+). Вдоль оси второй главной компоненты (PC2) форма пясти укорачивается (PC2-) или удлиняется (PC2+). Для кистей ульнарного (U) типа характерна широкая и короткая форма пясти, близкая к квадратной, для кистей радиального (R) типа характерна узкая и удлиненная форма пясти, близкая к трапециевидной (рис. 2).

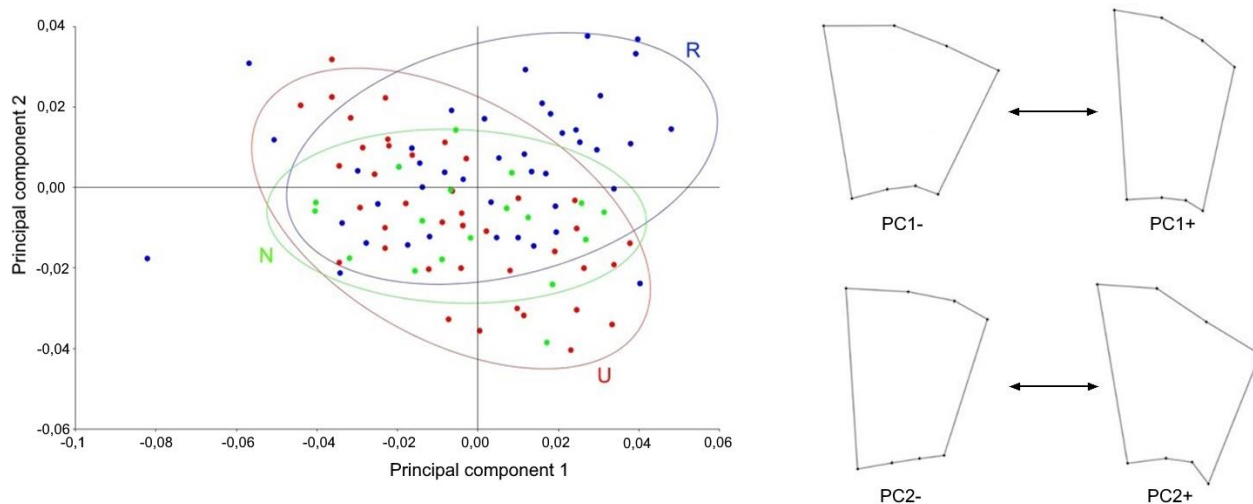


Рис. 2. Изменения формы пясти относительно первой (PC1) и второй (PC2) главной компоненты (доверительные эллипсы 95% вариальности; PC1(+/-) и PC2(+/-) соответственно)

Детальный анализ относительных деформаций демонстрирует, что форма пясти обусловлена сочетанной и разнонаправленной трансформацией, связанной с двумя группами ориентиров: 2, 4, 5, 7 и 1, 3, 6, 8. Локальная трансформация в проксимодистальном направлении связана с ориентирами 2, 4 и 5, 7, что обуславливает неафинную, или неоднородную, деформацию формы пясти в зависимости от морфологического типа кисти (PC1- \leftrightarrow PC1+). Глобальная трансформация связана со всеми ориентирами, что обуславливает афинную, или однородную, деформацию формы: короткая и широкая или вытянутая и узкая пясть. Установлено, что локальной трансформации в радиоульнарном направлении, связанной с ориентирами 2, 4, 6, 8, наблюдается обратная по направлению трансформация, связанная с ориентирами 1, 3, 5, 8 (рис. 3).

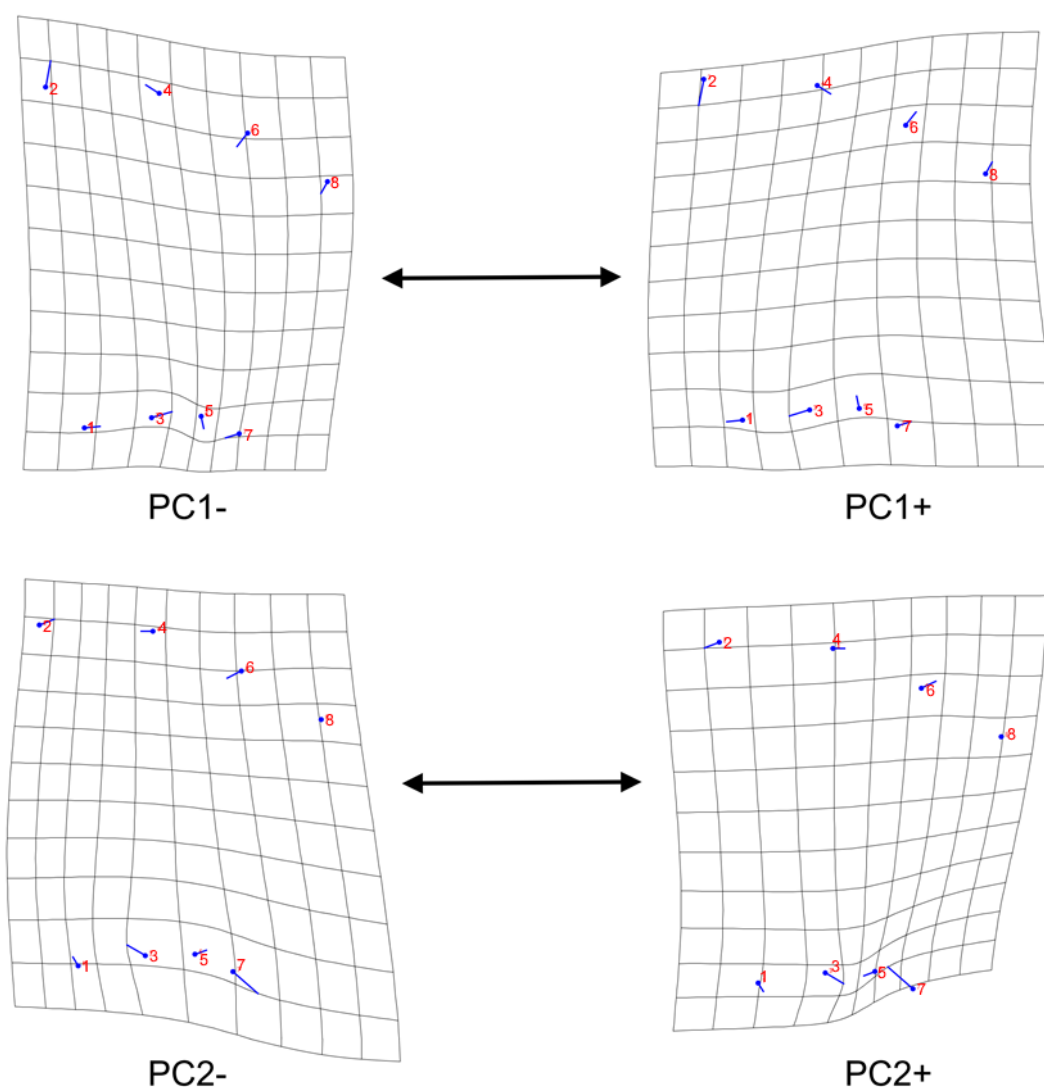


Рис. 3. Локальные изменения формы пясти в пространстве относительно средней конфигурации вдоль осей PC1 и PC2 (PC1(+/-) и PC 2 (+/-) соответственно) в зависимости от смещения векторов положения ориентиров на трансформационных решетках

Результаты CVA демонстрируют, что 79,7% различий между формами пясти в зависимости от морфологического типа кисти объясняются первыми двумя каноническими переменными (Canonical variate) (рис. 4). Независимо от пола более выраженные различия установлены между формами пястей кистей ульнарного и радиального (U/R) типов (расстояние Mahalanobis=2,9476–3,0027, $p<0,05$). В меньшей степени различаются формы пястей кистей радиального и неопределенного (R/N), а также ульнарного и неопределенного (U/N) типов как у мужчин (расстояние Mahalanobis=1,8215–2,8817, $p<0,05$), так и у женщин (расстояние Mahalanobis=2,028–2,6375, $p<0,05$).

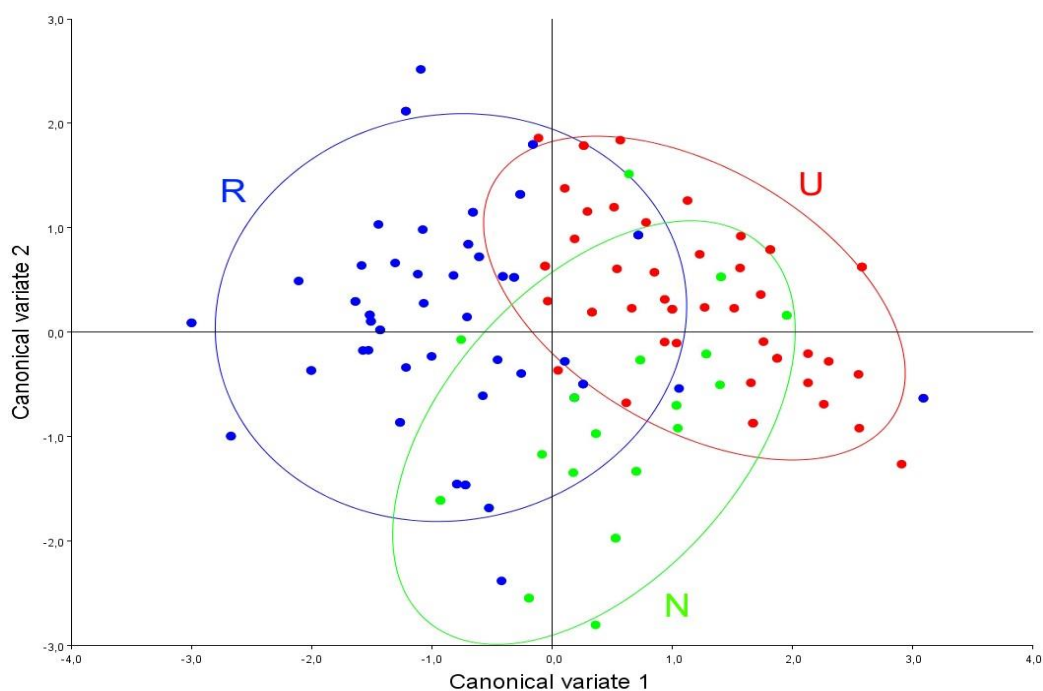
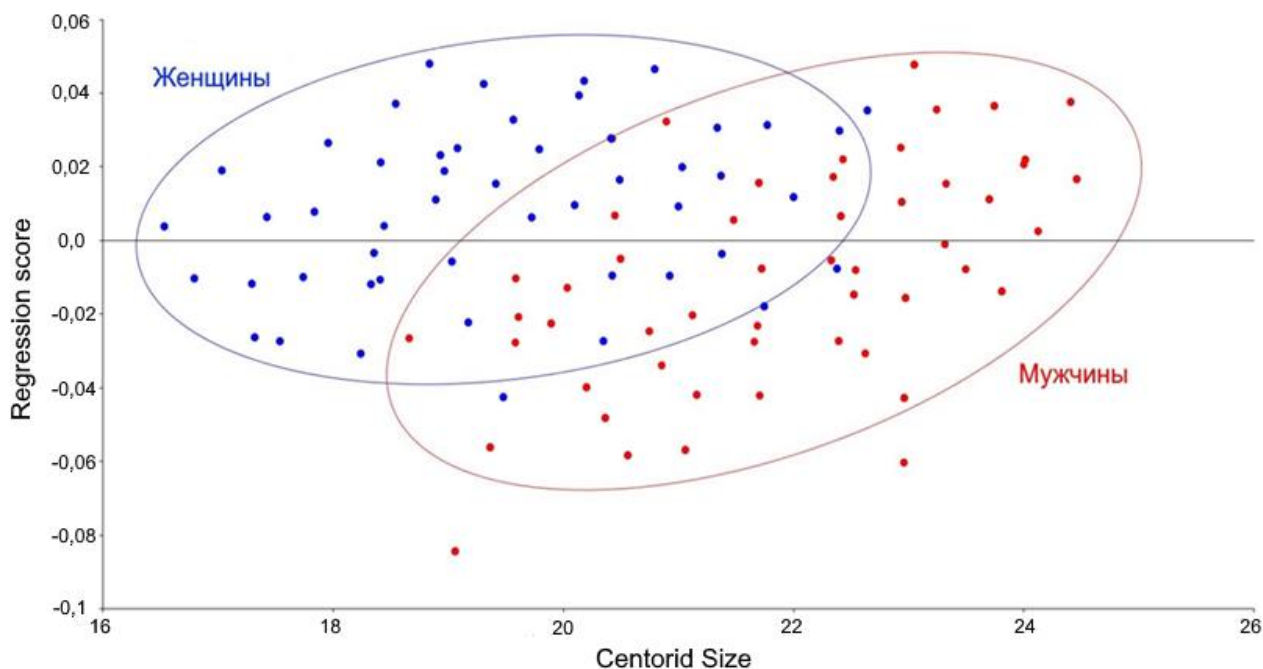


Рис. 4. Различия между формами пясти в зависимости от морфологического типа кисти (доверительные эллипсы 95% вариабельности)

Многомерная регрессия показала 9,4% и 9,3% аллометрии пясти у мужчин и женщин



соответственно со значительным значением перестановки ($p < 0,05$) (рис. 5).

Рис. 5 Регрессия оценок относительных изменений по CS пясти (график, обобщающий взаимосвязь между изменением размера и формы) (доверительные эллипсы 95% вариабельности)

Полученные в настоящем исследовании данные указывают на то, что изменчивость формы пясти у человека обусловлена тремя типами трансформаций: глобальные однородные (аффинные) изменения формы, одинаково влияющие на всю пясть; локальные неоднородные (неаффинные) изменения формы, общие для всей пясти; которые характерны для определенной группы пястных костей. Наиболее важным моментом является преобладание наблюдаемой вариабельности формы пясти, связанной с морфологическим типом кисти, что обусловлено неаффинными (локальными) трансформациями в радиоульнарном направлении, которые одновременно сочетаются с аффинными (глобальными) трансформациями в проксимодистальном направлении. Вариабельность формы, связанной с аффинным компонентом, представлена изменением (деформационным изменением) соотношения между проксимодистальным и радиоульнарным размерами. Степень вариабельности, охватываемая аффинным компонентом, свидетельствует о том, что пясть кисти человека представляет собой структурно однородную систему, в которой положение, размер и форма каждой кости структурно взаимосвязаны со всеми остальными [1]. В отличие от аффинных трансформаций, объясняющих подавляющее большинство изменений формы в контексте широкая или узкая пясть, неаффинные трансформации характеризуются одновременным, но неравномерным изменением положения нескольких ориентиров в различных направлениях. Это согласуется с теорией о трансформации кисти, связанной с локомоторной адаптацией и преобладанием функции захвата [14]. Как у мужчин, так и у женщин форма пясти слабо зависит от размеров последней, что обусловлено морфогенетическими взаимодействиями в области апикального эктодермального гребня (apical ectodermal ridge) зачатка будущей кисти – положение, дифференцировка, развитие и равномерный рост пястных костей [15].

Заключение. Данное исследование показывает, что форма пясти у человека в значительной степени связана с морфологическим типом кисти, при этом форма пясти слабо зависит от ее размера. Это первое исследование с использованием геометрической морфометрии для оценки соответствия между формой пясти и типологическими особенностями кисти. Применение геометрической морфометрии является рациональным аналитическим подходом, открывающим новые перспективы для проверки гипотез, связанных с изменчивостью формы пясти в зависимости от биологических и социальных факторов.

Список литературы

1. Sokolowska-Pituchowa J., Feret J. Proportions in the skeleton of the metacarpus // *Folia morphologica*. 1976. Vol. 35. Is. 2. P. 117-122.
2. Almécija S., Smaers J.B., Jungers W.L. The evolution of human and ape hand proportions // *Nature communications*. 2015. Is. 6. P. 7717. DOI: 10.1038/ncomms8717.
3. Морфология человека / под ред. Б.А. Никитюка, В.П. Чтецова. М.: изд-во Московского государственного университета, 1990. С. 135.
4. Kivell T.L. Evidence in hand: recent discoveries and the early evolution of human manual manipulation // *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*. 2015. Vol. 370. Is. 1682. P. 20150105. DOI: 10.1098/rstb.2015.0105.
5. Hajaghazadeh M., Taghizadeh M., Khalkhali H., Mohebbi I. Hand anthropometry survey in Iranian adults and comparisons with other populations // *Work: a journal of prevention, assessment, and rehabilitation*. 2021. Vol. 70. Is. 2. P. 633-644. DOI: 10.3233/WOR-213599.
6. Klingenberg C.P. Size, shape, and form: concepts of allometry in geometric morphometrics // *Development genes and evolution*. 2016. Vol. 226. Is. 3. P. 113-137. DOI: 10.1007/s00427-016-0539-2.
7. Rummel A.D., Sheehy E.T., Schachner E.R., Hedrick B.P. Sample Size and Geometric Morphometrics Methodology Impact the Evaluation of Morphological Variation // *Integrative organismal biology*. 2024. Vol. 6. Is. 1. P. obae002. DOI: 10.1093/iob/obae002.
8. Bookstein F.L. A method of factor analysis for shape coordinates // *American journal of biological anthropology*. 2017. Vol. 164. Is. 2. P. 221-245. DOI: 10.1002/ajpa.23277.
9. Mitteroecker P., Schaefer K. Thirty years of geometric morphometrics: Achievements, challenges, and the ongoing quest for biological meaningfulness // *American journal of biological anthropology*. 2022. Vol. 178. Suppl. 74. P. 181-210. DOI: 10.1002/ajpa.24531.
10. Khaïrullin R. Segmental 2:4 digit ratio. Unilateral, bilateral and hand-type differences in men // *Homo*. 2011. Vol. 62. Is. 6. P. 478-86. DOI: 10.1016/j.jchb.2011.09.001.
11. Rohlf F.J. The TPS series of software // *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy*. 2015. Vol. 26. Is. 1. P. 9-12. DOI: 10.4404/hystrix-26.1-11264.
12. Klingenberg C.P. MorphoJ: an integrated software package for geometric morphometrics // *Molecular ecology resources*. 2011. Vol. 11. Is. 2. P. 353-357. DOI: 10.1111/j.1755-0998.2010.02924.x.
13. Outomuro D., Johansson F. A potential pitfall in studies of biological shape: Does size matter? // *The Journal of animal ecology*. 2017. Vol. 86. Is. 6. P. 1447-1457. DOI: 10.1111/1365-2656.12732.

14. Chavez T.J., Morrell N.T. The Evolution of the Human Hand From an Anthropologic Perspective // The Journal of hand surgery. 2022. Vol. 47. Is. 2. P. 181-185. DOI: 10.1016/j.jhsa.2021.07.006.
15. McQueen C., Towers M. Establishing the pattern of the vertebrate limb // Development. 2020. Vol. 147. Is. 17. P. dev177956. DOI: 10.1242/dev.177956.