

АНАТОМИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛУЧЕЙ КИСТИ ЧЕЛОВЕКА

Ермоленко А.С.

ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», Ульяновск, e-mail: osteon@yandex.ru

С целью изучения анатомической изменчивости лучей кисти взрослого человека и их взаимосвязи с пальцевым индексом сделана рентгенография кистей 50 мужчин (возраст 23–63 года) и 50 женщин (возраст 23–65 лет). На рентгенограммах измерены длины I–V пальцев, пястных костей и лучей кисти. Пальцевый индекс рассчитан как отношение длины безымянного пальца к длине указательного. Пястно-фаланговый индекс рассчитан как отношение длины пальца к длине пястной кисти. Установлено, что лучи кисти человека характеризуются ярко выраженным половым диморфизмом. Билатеральные различия анализируемых параметров независимо от пола и пальцевого индекса статистически не значимы. Распределение пястных костей независимо от пола имеет вид: II>III>IV>V>I. Распределение пальцев по длине у мужчин имеет вид III>IV>II>V>I, у женщин – III>II>IV>V>I. Как у мужчин, так и женщин распределение лучей кисти имеет вид III>II>IV>V>I. Независимо от пола и типа кисти в пропорциях лучей длина пальцев преобладает над длиной пястных костей, а распределение лучей в зависимости от величины пястно-фалангового индекса имеет вид I≥II>V>III>IV. У мужчин выявлена корреляционная связь между пальцевым индексом и длинами IV–V лучей, в то время как у женщин – между пальцевым индексом и II–III лучами. Лучи кисти независимо от пола организованы в три кластера: первый кластер – I луч, второй кластер – II–IV лучи, третий кластер – V луч. У мужчин наиболее схожими являются III–IV лучи, в то время как у женщин – II–III лучи. Для человека, как и для большинства приматов, характерна мезаксоническая форма кисти, однако результаты кластерного анализа демонстрируют, что кисти мужчин в большей степени являются параксоническими.

Ключевые слова: лучи кисти, пястно-фаланговый индекс, рентгеностеометрия, соотношение 2D:4D.

ANATOMICAL VARIABILITY OF THE RAYS OF THE HUMAN HAND

Ermolenko A.S.

FGBOU VO «Ulyanovsk State University», Ulyanovsk; e-mail: osteon@yandex.ru

In order to study the anatomical variability of the rays of the adult hand and their relationship with the finger index, radiography of the hands of 50 men (age 23–63 years) and 50 women (age 23–65 years) was performed. The radiographs measured the lengths of the I–V fingers, metacarpal bones and rays of the hand. The finger index is calculated as the ratio of the length of the ring finger to the length of the index finger. The metacarpophalangeal index is calculated as the ratio of the length of the finger to the length of the metacarpal hand. It is established that the rays of the human hand are characterized by pronounced sexual dimorphism. The bilateral differences in the analyzed parameters, regardless of gender and finger index, are not statistically significant. The distribution of the metacarpal bones, regardless of gender, is as follows: II>III>IV>V>I. The distribution of fingers along the length in men has the form-III>IV>II>V>I, in women-III>II>IV>V>I. In both men and women, the distribution of the brush rays has the form-III>II>IV>V>I. Regardless of the gender and type of hand, in the proportions of the rays, the length of the fingers prevails over the length of the metacarpal bones, and the distribution of rays, depending on the value of the metacarpal-phalangeal index, has the form – I≥II>V>III>IV. In men, a correlation was found between the finger index and the lengths of the IV–V rays, while in women between the finger index and the II–III rays. The brush rays, regardless of gender, are organized into three clusters: the first cluster is the I ray, the second cluster is the II–IV rays, and the third cluster is the V ray. In men, the III–IV rays are the most similar, while in women, the II–III rays are the most similar. For humans, as for most primates, the mesaxonic shape of the hand is characteristic, but the results of cluster analysis show that the hands of men are more paraxonic.

Keywords: hand rays, metacarpophalangeal index, X-ray osteometry, 2D:4D ratio.

Кисти у человека (autopodium), как и у самых ранних приматов, являются пентадактилиями, что означает, что у них есть пять лучей [1]. Пальцы (acropodium) и соответствующие им пястные кости (metapodium) составляют лучи autopodium [2]. В зависимости от соотношения длин выделяют три основных морфологических паттерна лучей

autopodium у приматов: эктаксонический (длина IV луча преобладает над остальными), параксонический (длина III и IV луча преобладает над остальными, при этом длина этих лучей одинаковая) и мезаксонический (длина III луча преобладает над остальными) [3]. У большинства тетрапод выделяют преаксиальную (I палец и I пястная кость) и постаксиальную (II–V пальцы и II–V пястные кости) группы лучей [4]. Пропорции autopodium в контексте биометрических соотношений относительной длины лучей влияют на манипулятивные навыки кистей больше, чем любые другие анатомические характеристики [5]. Прецизионность при захвате предметов пальцами в ходе эволюционной трансформации кисти реализуется посредством изменения длин элементов пре- и постаксиальных лучей последней без строгой координации между последними [6]. С точки зрения биомеханики лучи кисти представляют собой разомкнутую кинематическую цепь, в которой при структурном анализе отдельные кости рассматриваются как подвижные части, а их суставы – как кинематические пары различных классов [7]. Слишком большая разница между длиной пальцев пре- и постаксиальной группы лучей ограничивает контакт дистальных фаланг последних при противопоставлении, увеличении нагрузки на мышцы для стабилизации межфаланговых и пястно-фаланговых суставов [8]. Пропорции между большим пальцем и остальными настолько важны, что некоторые авторы на основании длин этих пальцев по отношению друг к другу выделяют индекс противопоставимости [9].

Морфогенез лучей autopodium – сложная процедура: развитие и дифференцировка элементов лучей обусловлены экспрессией HOX-генов, белок Sonic hedgehog влияет на сегментацию пальцев, процесс апоптоза (регулируемый Bone Morphogenetic Proteins, которые, в свою очередь, зависят от Sonic hedgehog) определяет разделение пальцев друг от друга [10]. Одним из ключевых моментов в морфогенезе autopodium является пренатальное воздействие продуктов половых желёз (например, тестостерона), которые могут влиять на соотношение некоторых элементов лучей, в частности на указательный и безымянный пальцы, соотношение длин которых определяет пальцевый индекс [11]. Причем у женщин указательный палец длиннее безымянного, а мужчин наблюдается обратное соотношение [12]. Отношение длины указательного пальца к длине безымянного пальца (2D:4D ratio) как маркер уровня тестостерона в период эмбрионального развития служит предметом дискуссий на протяжении многих лет. 2D:4D ratio определяется в первом триместре беременности и не претерпевает существенных изменений в период постнатального онтогенеза [13]. Несмотря на многочисленные исследования анатомии костей рук по данным рентгенографии, в которых предметом исследования являлись пястные кости, пальцы или фаланги пальцев, имеются единичные работы, посвященные анатомии лучей кисти, однако они отражают аспекты сравнительной анатомии отряда приматов [2, 14].

Цель исследования: установить закономерности анатомической изменчивости лучей кисти взрослого человека и их взаимосвязь с пальцевым индексом по данным рентгеностеометрии.

Материал и методы исследования

Участниками настоящего исследования были 50 мужчин в возрасте 23–63 года и 50 женщин в возрасте 23–65 лет, постоянно проживающих на территории Среднего Поволжья. Из исследования были исключены лица с известными заболеваниями и посттравматическими деформациями кистей. Исследования проводились в соответствии с российским законодательством и этическими правилами Хельсинкской декларации для исследований, проводимых на людях. Все процедуры исследования были согласованы. Испытуемые подписали форму информированного согласия. Весь проект был одобрен комитетом по этике Ульяновского государственного университета. Рентгенография правых и левых кистей выполнена в переднезадней проекции (центр рентгеновского излучения был направлен на третий пястно-фаланговый сустав), источник рентгеновского излучения располагался в 90 см от объекта исследования. Рентгенография проводилась при выдержке 5 секунд и экспозиции 100 мА. Морфометрия цифровых изображений рентгенограмм выполнена в программе *Nipax Private Health Disk Image Viewer* с точностью до 0,1 мм. Каждая кисть была классифицирована в соответствии с длиной указательного пальца: более длинный (тип I, $2D > 4D$), равный (тип II, $2D = 4D$) или короче безымянного пальца (тип III, $2D < 4D$) – путем визуального сравнения соотношения наиболее отделенных точек на концах дистальных фаланг пальцев друг относительно друга на рентгенограмме [15]. Морфометрия рентгенограмм включала измерение длины I–V пальцев (расстояние между центром суставной поверхности проксимального эпифиза проксимальной фаланги и наиболее удаленной от него точкой на дистальном эпифизе дистальной фаланги), I–V пястных костей (расстояние между центром суставной поверхности проксимального эпифиза и наиболее удаленной от него точкой на дистальном эпифизе) и I–V лучей кисти (расстояние между центром суставной поверхности проксимального эпифиза пястной кости и наиболее удаленной от него точкой на дистальном эпифизе дистальной фаланги). Пястно-фаланговый индекс рассчитывали как отношение длины пальца к длине пястной кисти. Все статистические вычисления проводились с использованием программ *Statistica 13.3* (StatSoft, Palo Alto, CA, USA) и *OriginPro 2021* (OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA). Количественные данные были проверены на наличие выбросов (Grubbs test) с последующей проверкой типа распределения выборок (Shapiro–Wilk W Test). Для каждого показателя были рассчитаны среднее значение, стандартное отклонение и доверительный интервал. Для оценки различий между двумя группами наблюдений использован t-критерий. Для оценки различий между тремя и более

группами использован односторонний дисперсионный анализ (ANOVA, Bonferroni Post Hoc Test). Оценка взаимосвязи между количественными переменными определялась при помощи коэффициента корреляции Пирсона (r). Оценка зависимости одной переменной от двух или более независимых переменных выполнена при помощи множественного регрессионного анализа. Анализ сходства между группами наблюдений проведен при помощи иерархического кластерного анализа.

Результаты исследования и их обсуждение

В исследуемой выборке средний возраст мужчин составил 46,08 (10,01) года (M(SD)), женщин – 48,24 (10,01) года. Разница в возрасте между мужчинами и женщинами не была значимой ($p=0,28$). Половые различия анализируемых показателей, как и следовало ожидать, ярко выражены и статистически достоверны ($t=6,7-13,7$, $p<0,05$). Билатеральные различия анализируемых параметров независимо от пола и пальцевого индекса статистически не значимы ($p>0,05$), вследствие чего показатели для правых и левых кистей объединены в одну группу. Описательная статистика морфометрических показателей представлена в таблице 1.

Таблица 1

Длина пястных костей, пальцев и лучей кисти

		Мужчины			Женщины		
		n	M (SD), мм	95% CI, мм	n	M (SD), мм	95% CI, мм
Пястные кости	I	93	46,69 (2,56)	46,16–47,22	80	43,32 (2,52)	42,76–43,88
	II	93	69,98 (3,58)	69,25–70,72	80	65,46 (3,67)	64,65–66,28
	III	94	65,82 (3,35)	65,13–66,51	81	61,60 (3,66)	60,79–62,41
	IV	93	58,6 (2,54)	58,08–59,13	79	55,06 (2,83)	54,42–55,69
	V	88	53,2 (2,44)	52,68–53,71	80	49,83 (3,56)	49,04–50,62
Пальцы	I	93	53,1 (2,4)	52,6–53,6	81	47,4 (2,9)	46,7–48
	II	93	78,6 (3,8)	77,8–79,3	81	81,3 (5,5)	80,1–82,5
	III	90	89,8 (3,6)	89,1–90,6	81	83,8 (5,7)	82,6–85,1
	IV	92	86 (3,5)	85,3–86,8	81	74,3 (4,4)	73,3–75,3
	V	91	67,8 (3,4)	67,1–68,5	81	62,2 (3,8)	61,3–63
Лучи	I	93	99,9 (4,1)	99–100,7	81	90,7 (5,2)	89,5–91,9
	II	92	148,6 (6,2)	147,3–149,9	81	141,7 (8,5)	139,9–143,6
	III	91	155,8 (5,7)	154,6–157	81	145,3 (8,7)	143,4–147,3
	IV	90	143,2 (4,8)	142,2–144,2	81	128,7 (8,7)	126,7–130,6
	V	93	120,9 (5,4)	119,8–122,1	80	111,9 (7)	110,3–113,4

Распределение пястных костей в зависимости от длины как у мужчин ($F=949,7$, $p<0,05$), так и у женщин ($F=586,6$, $p<0,05$) имеет вид: II>III>IV>V>I. Распределение пальцев по длине у мужчин имеет вид III>IV>II>V>I ($F=1789,1$, $p<0,05$), у женщин – III>II>IV>V>I ($F=847,59$, $p<0,05$). Как у мужчин ($F=1768,9$, $p<0,05$), так и у женщин ($F=740,9$, $p<0,05$) распределение лучей кисти в зависимости от длины имеет вид III>II>IV>V>I (рис. 1).

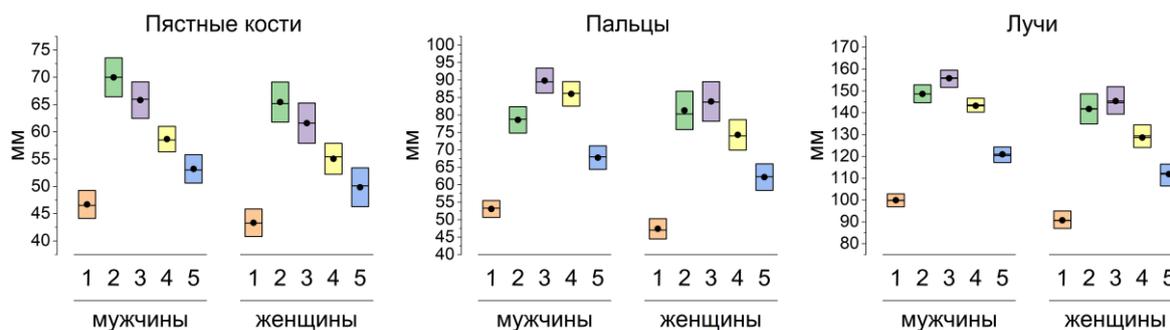


Рис. 1. Различия между средними значениями анализируемых групп наблюдений, $t(SD)$

Распределение типов соотношения длин пальцев и значения 2D:4D соотношения в исследуемой выборке представлены в таблице 2. Значение пальцевого индекса у мужчин было ниже, чем у женщин ($t=14,05-33,87$, $p<0,05$).

Таблица 2

Распределение и значение соотношений длин пальцев (2D:4D)

Пол	Тип кисти	n (%)	M (SD), мм	95% CI, мм
Мужчины	I (2D>4D)	19 (20,9%)	0,92 (0,02)	0,91–0,93
	II (2D=4D)	9 (9,9%)	0,91 (0,03)	0,89–0,93
	III (2D<4D)	63 (69,2%)	0,9 (0,04)	0,89–0,91
Женщины	I (2D>4D)	43 (53,1%)	1,1 (0,02)	1,09–1,11
	II (2D=4D)	10 (12,3)	1,09 (0,03)	1,07–1,11
	III (2D<4D)	28 (34,6%)	1,07 (0,03)	1,06–1,08

Первый тип кисти встречается чаще у женщин, в то время как третий тип кисти чаще встречается у мужчин, при этом у женщин третий тип кисти встречался в 1,5 раза чаще первого типа кисти у мужчин. Статистически значимые различия в зависимости от величины пальцевого индекса выявлены между первым и третьим типом кисти как у мужчин ($F=2,86$, $p<0,05$), так и у женщин ($F=12$, $p<0,05$) (рис. 2).

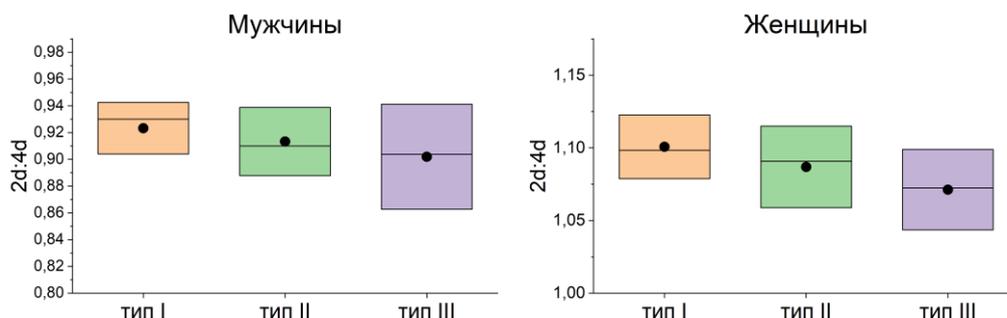


Рис. 2. Различия между средними значениями пальцевого индекса, $t(SD)$

Независимо от пола и типа кисти длина пальцев превышает длину пястных костей (табл. 3). По результатам дисперсионного анализа распределение лучей в зависимости от

величины пястно-фалангового индекса независимо от пола и типа кисти имеет вид $I \geq II > V > III > IV$ ($F=53,74-763,8$, $p<0,05$).

Таблица 3

Пястно-фаланговый индекс

Тип кисти	Лучи кисти	Мужчины			Женщины		
		n	M (SD), мм	95% CI, мм	n	M (SD), мм	95% CI, мм
2D>4D	I	19	0,88 (0,04)	0,86–0,9	40	0,91 (0,02)	0,9–0,92
	II	19	0,88 (0,05)	0,86–0,9	40	0,88 (0,02)	0,88–0,89
	III	19	0,73 (0,04)	0,72–0,75	42	0,73 (0,02)	0,73–0,74
	IV	19	0,69 (0,04)	0,67–0,71	43	0,68 (0,02)	0,67–0,69
	V	19	0,8 (0,06)	0,77–0,83	43	0,8 (0,03)	0,79–0,8
2D=4D	I	9	0,88 (0,06)	0,83–0,93	9	0,91 (0,02)	0,9–0,92
	II	9	0,89 (0,03)	0,87–0,92	8	0,88 (0,01)	0,87–0,88
	III	9	0,74 (0,03)	0,72–0,77	10	0,73 (0,02)	0,71–0,75
	IV	9	0,68 (0,02)	0,67–0,69	10	0,68 (0,03)	0,66–0,7
	V	9	0,79 (0,03)	0,77–0,82	10	0,8 (0,03)	0,78–0,82
2D<4D	I	65	0,88 (0,05)	0,87–0,89	24	0,91 (0,03)	0,9–0,93
	II	62	0,88 (0,04)	0,87–0,89	19	0,88 (0,02)	0,86–0,89
	III	65	0,74 (0,04)	0,73–0,75	26	0,73 (0,03)	0,72–0,74
	IV	66	0,68 (0,04)	0,67–0,69	26	0,67 (0,02)	0,66–0,68
	V	64	0,78 (0,04)	0,77–0,79	28	0,82 (0,03)	0,81–0,83

Выявлены статистически значимые положительные корреляции между длиной лучей и длинами соответствующих пястных костей и пальцев как у мужчин, так и женщин ($p<0,05$) (рис. 3).

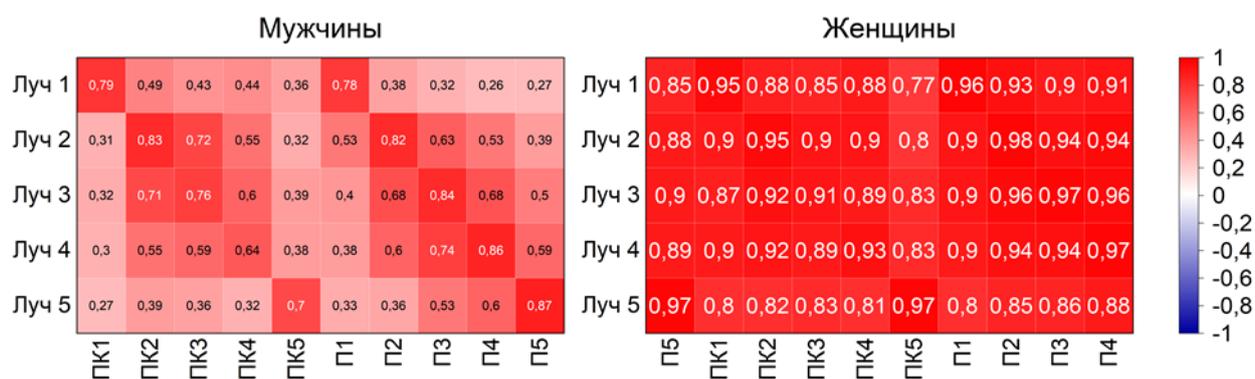


Рис. 3. Корреляции между длиной лучей, пястными костями и пальцами

Учитывая высокие значения коэффициентов корреляции, для выявления лучших предикторов и исключения мультиколлинеарности проведена процедура «Чистка и фильтрация данных» (Feature Selection and Variable Screening) из модуля Data mining, в результате которой установлено, что наиболее оптимальным фактором, определяющим длину луча независимо от пола, является длина пальца ($F\text{-value}=4,52-17,62$). Для оценки

закономерности длины лучей от длины пальцев был проведен регрессионный анализ. По данным регрессионного анализа зависимость длины лучей была достоверно положительно связана с длиной пальцев ($p < 0,05$) (табл. 4).

Таблица 4

Закономерности между длиной лучей и длиной и пальцев

	Лучи кисти (зависимая переменная)	R ² Regression coefficient	St. error	95% CI
Пальцы мужчин	I	0,82	0,03	0,7–0,94
	II	0,85	0,05	0,74–0,96
	III	0,89	0,05	0,8–0,99
	IV	0,9	0,05	0,81–0,99
	V	0,86	0,05	0,76–0,97
Пальцы женщин	I	0,96	0,03	0,9–1,02
	II	0,83	0,06	0,71–0,96
	III	0,97	0,03	0,91–1,02
	IV	0,98	0,02	0,93–1,02
	V	0,97	0,03	0,92–1,02

Выявлены статистически значимые корреляции между длиной лучей и пальцевым индексом (рис. 4). У мужчин наблюдается отрицательная корреляционная связь между пальцевым индексом и длинами IV–V лучей, в то время как у женщин – между пальцевым индексом и II–III лучами ($p < 0,05$).

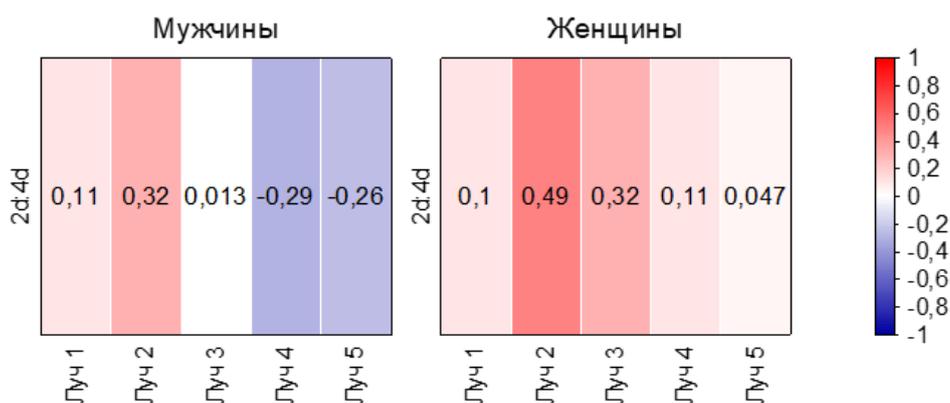


Рис. 4. Корреляции между длиной лучей и пальцевым индексом

Результаты исследования показали, что лучи кисти независимо от пола были организованы в три кластера: первый кластер представляет I луч, второй кластер представлен II–IV лучами и третий кластер представлен V лучом. Однако у мужчин наиболее схожими являются III и IV лучи, в то время как у женщин – II и III лучи (рис. 5).

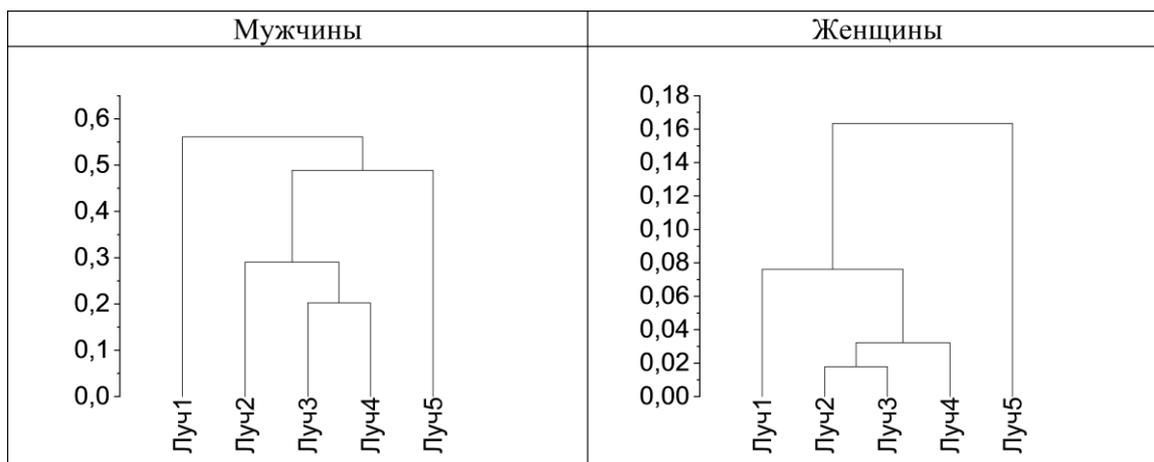


Рис. 5. Дендрограмма агрегаций лучей кисти (метод Ward, корреляционное расстояние $1 - Pearson r$)

Преобладание в пропорциях лучей длины пальцев над длиной пястных костей согласуется с мнением ряда авторов о повышении манипулятивной активности кистей и точности захвата в процессе эволюции [5]. Независимо от пола наблюдается снижение значения пястно-фалангового индекса от I пальца к V, что обусловлено эволюционной трансформацией кистей эволюции – утратой двигательной роли (при отказе от древесной локомоции) и усилением манипуляций [9]. Для человека, как и для большинства приматов, характерна мезаксоническая форма кисти, однако результаты кластерного анализа демонстрируют, что кисти мужчин в большей степени являются параксоническими [3]. Наиболее выраженные половые различия лучей кисти наблюдаются в *acropodium*, а именно в длине указательного и безымянного пальцев [12]. Половые различия в пропорциях элементов лучей кисти, возможно, являются результатом полового отбора у приматов для улучшения поражающей способности и одновременно защиты кисти от травм при ударе кулаком во время драки самцов [6]. Высокие уровни корреляции между пальцевым соотношением и длиной IV–V лучей у мужчин и II–III у женщин обусловлены влиянием половых гормонов во время эмбрионального развития, в том числе и балансом между эстрогеном и тестостероном [13].

Выводы

Таким образом, проведенное исследование выявило изменчивость лучей кисти человека в зависимости от пола и пальцевого индекса. Лучи кисти человека характеризуются половым диморфизмом и отсутствием билатеральных различий. Лучи постаксиальной группы характеризуются наибольшей изменчивостью. Длина лучей определяется длиной пальцев. Выявлена взаимосвязь между пальцевым индексом и длинами IV–V лучей у мужчин и пальцевым индексом и II–III лучами у женщин.

Список литературы

1. Chen M., Luo Z.X. Postcranial skeleton of the cretaceous mammal akidolestescifellii and its locomotor adaptations. *J. Mammal. Evol.* 2013. № 20. P. 159-189.
2. Maiolino S.A., Patel B.A. Morphological Diversity in the Digital Rays of Primate Hands. *Evolution of the Primate Hand: Anatomical, Developmental, Functional, and Paleontological Evidence.* New York: Springer-Verlag, 2016. P. 55-100.
3. Preuschoft H., Chivers D.J. *Hands of Primates.* Vienna: Springer-Verlag, 1993. 421 p.
4. Медников Д.Н. Филогенез верхней конечности: от плавника к пятипалой конечности // *Вопросы реконструктивной и пластической хирургии.* 2018. Т. 21. № 4. С. 55-60.
5. Tamagawa T., Lundh T., Shigetoshi K., Nitta N., Ushio N., Inubushi T., Shiino A., Karlsson A., Inoue T., Mera Y., Hino K., Komori M., Morikawa S., Sawajiri S., Naka S., Honma S., Kimura T., Uchimura Y., Imai S., Egi N., Otani H., Udagawa J. Correlation between musculoskeletal structure of the hand and primate locomotion: morphometric and mechanical analysis in prehension using the cross- and triple-ratios. *PLoS. One.* 2020. Vol. 15. № 5. P. e0232397.
6. Morgan M.H., Carrier D.R. Protective buttressing of the human fist and the evolution of hominin hands. *J. Exp. Biol.* 2013. Vol. 216. Pt. 2. P. 236-244.
7. Jaworski T., Karpiński R., Dobrowolska A. Biomechanics of the upper limb. *J. Technol. Exploit Mech. Eng.* 2016. Vol. 2. № 1. P. 56-59.
8. Rolian C., Lieberman D.E., Zermeno J.P. Hand biomechanics during simulated stone tool use. *J. Hum. Evol.* 2011. Vol. 61. № 1. P. 26-41.
9. Napier J.R., Napier P.H. *A handbook of living primates.* New York, Academic Press, 1967. 456 p.
10. McQueen C., Towers M. Establishing the pattern of the vertebrate limb. *Development.* 2020. Vol. 147. № 17. P. dev177956.
11. Kumar S., Voracek M., Singh M. Sexual Dimorphism in Digit Ratios Derived from Dorsal Digit Length among Adults and Children. *Front Endocrinol. (Lausanne).* 2017. № 8. P. 41.
12. Manning J.T., Fink B. Sexual dimorphism in the ontogeny of second (2D) and fourth (4D) digit lengths, and digit ratio (2D:4D). *Am. J. Hum. Biol.* 2018. Vol. 30. № 4. P. e23138.
13. Manning J.T., Fink B. Digit ratio. In book: *Encyclopedia of Evolutionary Psychological Science.* Cham: Springer, 2018. 10000 p.
14. Boyer D.M., Yapuncich G.S., Chester S.G.B., Bloch J.I., Godinot M. Hands of early primates. *Yearb. Phys. Anthropol.* 2013. № 57. P. 33-78.
15. Robertson J., Zhang W., Liu J.J., Muir K.R., Maciewicz R.A., Doherty M. Radiographic assessment of the index to ring finger ratio (2D:4D) in adults. *J. Anat.* 2008. Vol. 212. № 1. P. 42-48.