

## **ФЛУКТУИРУЮЩАЯ АСИММЕТРИЯ ФАЛАНГ ПАЛЬЦЕВ КИСТИ ЧЕЛОВЕКА ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНООСТЕОМЕТРИИ**

**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 флуктуирующую асимметрию (ФА) фаланг между пальцами и каждого пальца кисти человека в отдельности. В структуре направленной асимметрии длина фаланг пальцев правых кистей преобладает над длиной фаланг пальцев левых кистей независимо от пола. Между пальцами асимметрия проксимальных фаланг возрастает в направлении V пальца, асимметрия средних фаланг выражена слабо, асимметрия дистальных фаланг возрастает в направлении I пальца. Асимметрия фаланг каждого отдельного пальца независимо от пола возрастает в дистальном направлении. Выявлены различия по уровню ФА между проксимальными фалангами I и II–V пальцев независимо от пола, между средними фалангами III и IV, II и IV, II и V пальцев у мужчин и II и III, II и IV пальцев у женщин, дистальными фалангами II и IV, I и IV пальцев у мужчин и I и III, I и IV, I и V пальцев у женщин. Выявлены различия по уровню ФА между фалангами каждого пальца: I пальцы – уровень ФА дистальных фаланг выше, чем у проксимальных, независимо от пола, II и III пальцы – выявлены различия между проксимальными и средними, проксимальными и дистальными фалангами у мужчин и между проксимальными и дистальными, средними и дистальными фалангами у женщин, IV пальцы – между проксимальными и дистальными фалангами у мужчин, проксимальными и дистальными, средними и дистальными фалангами у женщин, V пальцы – между проксимальными и дистальными фалангами независимо от пола. Обнаруженные различия ФА фаланг указывают на направленный характер в продольной и поперечной оси, что, возможно, обусловлено влиянием половых гормонов на ранних этапах постнатального онтогенеза пальцев кистей, гетерохронией и различными функциональными нагрузками.

Ключевые слова: флуктуирующая асимметрия, направленная асимметрия, кисть человека, фаланги, рентгеноостеометрия.

## **FLUCTUATING ASYMMETRY OF THE PHALANGES OF THE FINGERS OF THE HUMAN HAND ACCORDING TO X-RAY OSTEOLOGY**

**Ermolenko A.S.**

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

The aim of the study is to study the fluctuating asymmetry (FA) of the phalanges between the fingers and each finger of the human hand separately. In the structure of directional asymmetry, the length of the phalanges of the fingers of the right hands prevails over the length of the phalanges of the fingers of the left hands, regardless of gender. Between the fingers, the asymmetry of the proximal phalanges increases in the direction of the V finger, the asymmetry of the middle phalanges is weakly expressed, the asymmetry of the distal phalanges increases in the direction of the I finger. The asymmetry of the phalanges of each individual finger, regardless of gender, increases in the distal direction. Differences in FA level were revealed between the proximal phalanges of I and II–V fingers regardless of gender, between the middle phalanges of III and IV, II and IV, II and V fingers in men and II and III, II and IV fingers in women, distal phalanges of II and IV, I and IV fingers in men and I and III, I and IV, I and V fingers in women. Differences in FA level between the phalanges of each finger were revealed: I fingers – the FA level of the distal phalanges is higher than that of the proximal phalanges regardless of gender, II and III fingers – differences between the proximal and middle, proximal and distal phalanges in men and between the proximal and distal, middle and distal phalanges in women, IV fingers – between proximal and distal phalanges in men, proximal and distal, middle and distal flanks in women, V fingers – between the proximal and distal phalanges, regardless of gender. The detected differences in the FA of the phalanges indicate a directional character in the longitudinal and transverse axes, which may be due to the influence of sex hormones in the early stages of postnatal ontogenesis of the fingers, heterochrony and various functional loads.

Keywords: fluctuating asymmetry, directional asymmetry, human hand, phalanges, X-ray osteometry.

Несмотря на то что кисти человека являются двусторонне симметричными, как и у большинства биологических объектов и форм, эта симметрия приближительная, что обусловлено нестабильностью развития во времени и пространстве [1]. Поскольку фаланги представляют собой независимые объекты пальцев одних и тех же кистей, случайные отклонения в ходе их развития от идеальной симметрии в контексте билатеральных признаков могут иметь незначительные морфологические различия [2].

Отклонения от двусторонней симметрии можно разделить на три составляющие: направленная асимметрия, флуктуирующая асимметрия (ФА) и антисимметрия. Направленная асимметрия характеризуется различиями между двумя сторонами тела биологических объектов и обычно ассоциируется с факторами окружающей среды и адаптивным стрессом [3]. ФА определяются как случайные ненаправленные отклонения симметричного состояния между правой (R) и левой (L) сторонами морфологического признака [4].

Когда распределение количественной разницы между морфологическими признаками, относящимися к правой и левой сторонам тела, приближается к нормальной кривой со средним значением, равным или близким к нулю, дисперсия распределений этих различий является мерой ФА [5]. ФА рассматривается как потенциальная мера степени переживания стресса индивидом, а также как отражение способности генотипа компенсировать этот стресс [6]. Нестабильность развития, которая приводит к асимметрии, может быть вызвана снижением генетического контроля над процессами развития. По мнению некоторых авторов, ФА обусловлена как генетическими, так и негенетическими (эпигенетическими) факторами [7].

Изучение ФА характеризуется потенциальными проблемами и предубеждениями. Уровни ФА обычно невелики и составляют порядка 1% по отношению к размеру признака, поэтому ФА можно легко спутать с погрешностью измерения и другими формами асимметрии [1]. Использование ФА в качестве показателя нестабильности развития неявно предполагает, что обе стороны развиваются в совершенно одинаковых условиях. Однако, особенно у людей, латерализация, обусловленная различными функциональными нагрузками кистей, может не отражать достоверно нестабильность развития [8]. Считается, что для частей тела, характеризующихся половым диморфизмом, значения ФА наиболее высоки, что обусловлено их большей чувствительностью к стрессу [9]. Асимметрия фаланг пальцев по некоторым морфологическим переменным может демонстрировать различные уровни чувствительности к воздействию факторов окружающей среды, проявляющиеся в отклонениях от гармоничного развития кисти. Изучение ФА фаланг пальцев кисти человека расширяет теоретические представления об их случайной изменчивости, их разнообразии и вкладе в общую изменчивость [10]. Двусторонняя симметрия фаланг пальцев определяется одними и теми же

генами и обусловлена общими морфогенетическими процессами для обеих кистей. В идеальных условиях фаланги пальцев кистей должны развиваться идентично и быть зеркальной копией фаланг противоположной кисти, однако эффекты небольших пертурбаций в ходе развития могут накапливаться отдельно для каждой из кистей, вызывая ФА [11]. Одним из прикладных аспектов изучения ФА фаланг пальцев кисти человека является установление распределения и направления асимметрии как между фалангами одного пальца, так и между фалангами разных пальцев.

Цель исследования – изучить ФА фаланг между пальцами и для каждого пальца кисти человека в отдельности по данным рентгеноостеометрии.

**Материал и методы исследования.** Объектом исследования явились цифровые изображения рентгенограмм кистей (прямая проекция) 300 человек (150 мужчин и 150 женщин) из архива цифровых изображений отделения лучевой диагностики ГУЗ «Ульяновский областной клинический центр специализированных видов медицинской помощи им. Заслуженного врача России Е.М. Чучкалова». Критерием включения в исследование являлось отсутствие нарушения целостности, аномалий развития, деформаций и костно-суставной патологии кистей. Средний возраст мужчин составил  $49,5 \pm 1,1$  года ( $M \pm m$ ), средний возраст женщин –  $47,3 \pm 0,9$  года ( $M \pm m$ ). При помощи программы Nipax Private Health Disk Image Viewer выполнена морфометрия цифровых изображений рентгенограмм кистей с точностью до 0,1 мм, которая включала измерения длин проксимальных фаланг, средних фаланг и дистальных фаланг I–V пальцев на правой и левой кистях (рис. 1).



*Рис. 1. Иллюстрация рентгенограммы кисти с измеренными параметрами*

Асимметрия длин фаланг пальцев была рассчитана как разница между правыми и левыми кистями. Значение ФА было рассчитано по формуле:  $ФА = |L - R| / ((L + R) / 2)$ , где L и R представляют длину фаланги правой и левой кисти соответственно [5].

Оценка распределения анализируемых признаков (проверка на нормальность распределения количественных данных) и удаление из исследования аномальных значений выполнены с использованием Shapiro–Wilk W Test и Grubbs test. Для анализа различий между двумя группами наблюдений использован параметрический критерий для независимых групп Student's t-test. Оценка различий между тремя группами наблюдений выполнена с использованием дисперсионного анализа, в рамках которого для различия средних значений анализируемых признаков при множественных сравнениях использована поправка Bonferroni.

### **Результаты исследования и их обсуждение**

Анализ направленной асимметрии демонстрирует преобладание длины фаланг пальцев правых кистей над длиной фаланг пальцев левых кистей ( $L < R$ ). Длина фаланг правых кистей превышает длину фаланг левых кистей у мужчин в 1,6 раза, у женщин – в 2,5 раза (рис. 1). Независимо от пола асимметрия проксимальных фаланг возрастает в направлении V пальца у мужчин в 1,6 раза, у женщин – в 1,3 раза, в то время как колебания асимметрии средних фаланг выражены слабо, а асимметрия дистальных фаланг возрастает в отличие от асимметрии проксимальных фаланг в направлении I пальца у мужчин в 2 раза, у женщин – в 1,4 раза. В проксимо-дистальном направлении как у мужчин, так и у женщин длина фаланг пальцев правых кистей чаще превышает длину фаланг левых кистей ( $L < R$ ), при этом частота возрастает в дистальном направлении.

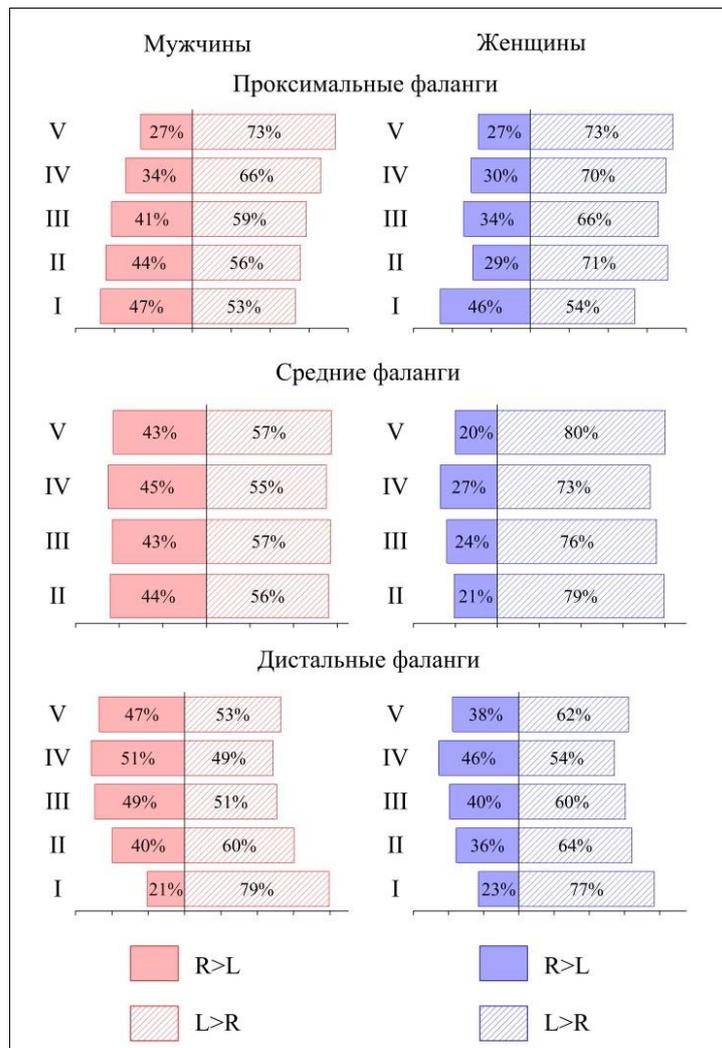


Рис. 2. Соотношение длин фаланг между пальцами правых и левых кистей

Описательная статистика абсолютных значений ФА фаланг пальцев кистей мужчин и женщин представлена в таблице 1. При сравнении фаланг пальцев кистей мужчин и женщин выявлены статистически значимые половые различия ( $t=2,56-6,15$ ,  $p<0,05$ ).

Таблица 1

Абсолютные величины ФА

Фаланги	Пальцы	Мужчины			Женщины		
		n	M	SD	n	M	SD
Проксимальные	I	119	0,03	0,014	82	0,022	0,011
	II	122	0,025	0,011	80	0,021	0,009
	III	119	0,023	0,011	84	0,016	0,009
	IV	120	0,021	0,009	84	0,014	0,006
	V	122	0,024	0,011	73	0,015	0,007
Средние	II	123	0,033	0,011	83	0,023	0,01
	III	119	0,03	0,013	83	0,021	0,01
	IV	120	0,023	0,011	78	0,018	0,009
	V	116	0,026	0,01	83	0,018	0,016

Дистальные	I	117	0,036	0,015	80	0,031	0,01
	II	122	0,036	0,015	82	0,029	0,011
	III	119	0,03	0,012	80	0,023	0,012
	IV	117	0,026	0,011	80	0,021	0,01
	V	125	0,031	0,016	82	0,023	0,01

n – число наблюдений, M – среднее значение, SD – стандартное отклонение

Выявлены статистически значимые внутригрупповые различия между проксимальными, средними и дистальными фалангами по уровню ФА в зависимости от пальцевой принадлежности и пола (Levene's Test for Homogeneity of Variances  $F=5,57-14,28$ ,  $p<0,05$ ) (табл. 2).

Таблица 2

Межпальцевые различия фаланг

Фаланги	Фактор	SS	Df	MS	F	p
Проксимальные	Пол	0,009	1	0,009	90	0,000
	Пальцы	0,01	4	0,002	23,7	0,000
Средние	Пол	0,017	1	0,017	132,9	0,000
	Пальцы	0,006	3	0,002	16,5	0,000
Дистальные	Пол	0,01	1	0,01	61	0,000
	Пальцы	0,009	4	0,002	14	0,000

SS – сумма квадратов, Df – число степеней свободы, MS – среднеквадратическое отклонение

Межгрупповые различия по уровню ФА выявлены для проксимальных фаланг – между I пальцами и II–V пальцами как у мужчин, так и у женщин, при этом различия между фалангами II–V пальцев статистически не значимы, для средних фаланг – между III и IV, II и IV, II и V пальцами у мужчин и между II и III, II и IV пальцами у женщин, для дистальных фаланг – между II и IV, I и IV пальцами у мужчин и между I и III, I и IV, I и V пальцами у женщин (рис. 3).

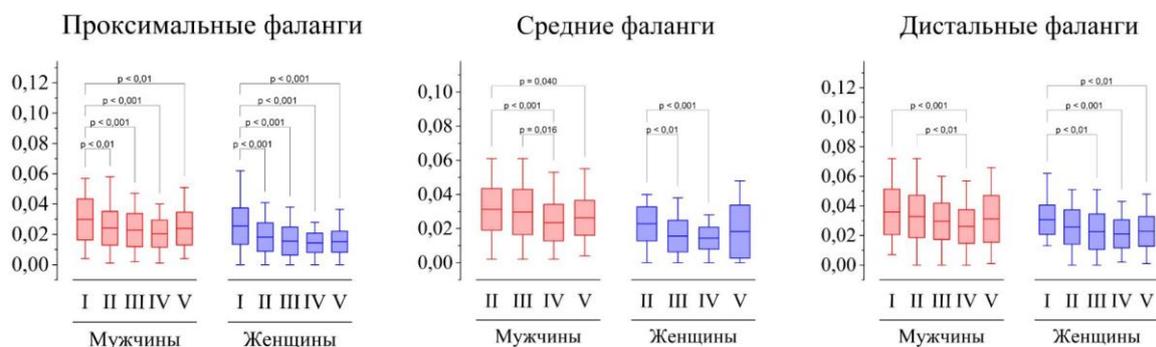


Рис. 3. Парные различия фаланг между пальцами по уровню ФА

Выявлены статистически значимые внутригрупповые различия по уровню ФА между фалангами для каждого из пяти пальцев в отдельности (Levene's Test for Homogeneity of Variances  $F=3,16-20,29$ ,  $p<0,05$ ) (табл. 3).

Таблица 3

Различия фаланг каждого пальца

Пальцы	Фактор	SS	Df	MS	F	p
I	Пол	0,02	1	0,02	13,4	0,000
	Фаланга	0,03	1	0,03	17,7	0,000
II	Пол	0,006	1	0,006	48,7	0,000
	Фаланга	0,007	2	0,004	27,2	0,000
III	Пол	0,011	1	0,011	85,9	0,000
	Фаланга	0,004	2	0,002	15	0,000
IV	Пол	0,006	1	0,006	67,2	0,000
	Фаланга	0,003	2	0,002	20,1	0,000
V	Пол	0,008	1	0,008	58,1	0,000
	Фаланга	0,005	2	0,002	16	0,000

SS – сумма квадратов, Df – число степеней свободы, MS – среднеквадратическое отклонение

Межгрупповые различия по уровню ФА выявлены для I пальцев – уровень ФА дистальных фаланг выше, чем проксимальных, как у мужчин, так и у женщин, для II и III пальцев – выявлены различия между проксимальными и средними, проксимальными и дистальными фалангами у мужчин и между проксимальными и дистальными, средними и дистальными фалангами у женщин, для IV пальцев – между проксимальными и дистальными фалангами у мужчин, проксимальными и дистальными, средними и дистальными фалангами у женщин, для V пальцев – между проксимальными и дистальными фалангами как у мужчин, так и у женщин (рис. 4).

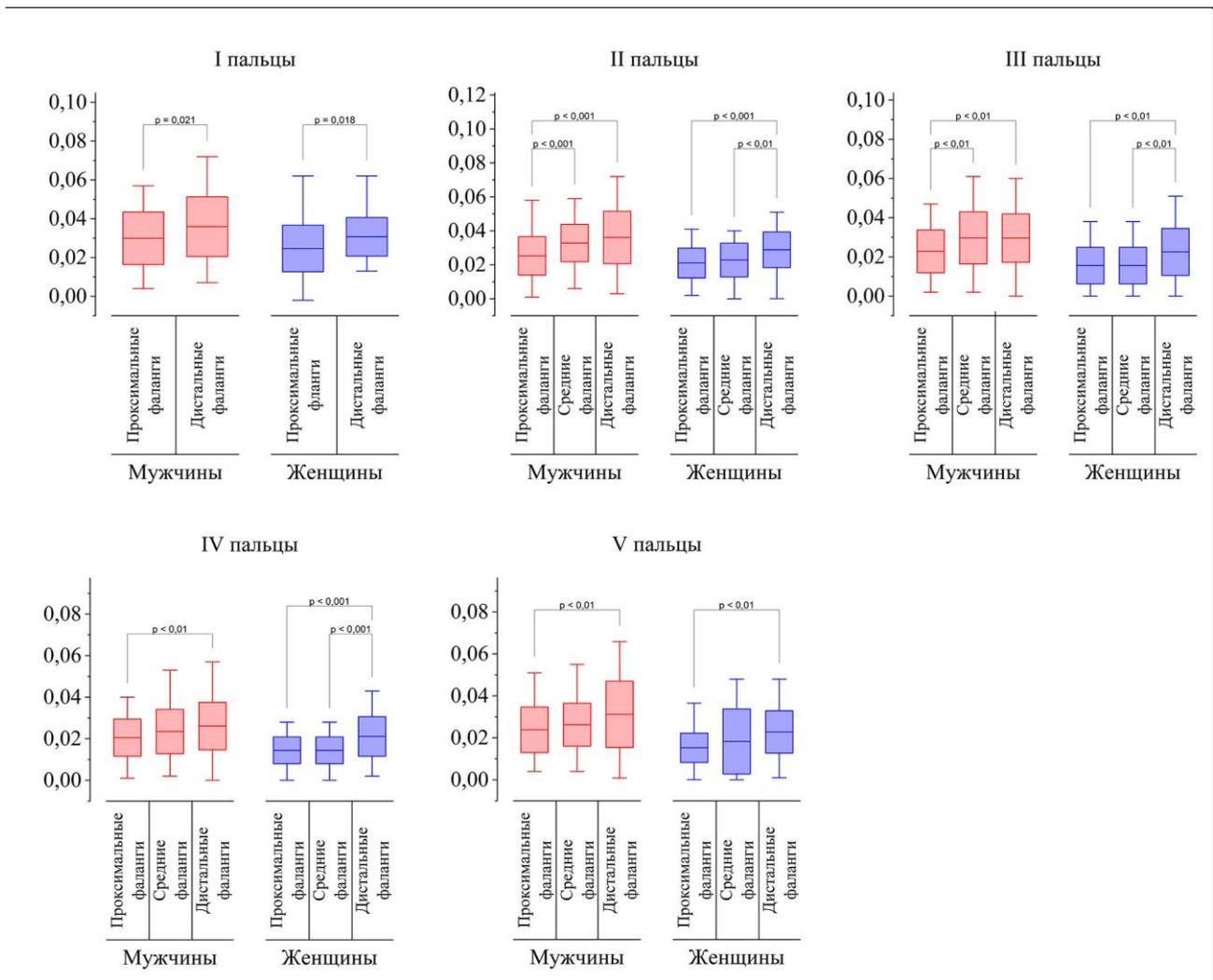


Рис. 4. Парные различия фаланг каждого пальца по уровню ФА

Существует множество экологических и генетических факторов, которые нарушают стабильную структуру развития организмов. Хотя сила их различна, они оставляют определенные следы в структуре тела. Флуктуирующая асимметрия – это широко используемый на популяционном уровне показатель нестабильности развития, шума развития и надежности. Многие двусторонние признаки используются в исследованиях флуктуирующей асимметрии у людей. Эти признаки включают дерматоглифику, длину и ширину конечностей, двусторонние черты лица и зубы. В этом обзоре автор оценивал методы измерения многих двусторонних антропометрических признаков, взятых с тел живых людей с помощью классических цифровых штангенциркулей.

Симметрия кистей и нестабильность развития являются актуальной проблемой в морфологии посткраниального скелета [10]. Небольшие, а иногда и заметные отклонения от идеальной двусторонней симметрии отражают уязвимость развития к факторам окружающей

среды и развития. Поскольку правая и левая кисти считаются генетически идентичными, отклонения симметрии традиционно приписываются негенетическим (эпигенетическим) эффектам [11]. Биологическая пластичность как адаптивная стратегия может свидетельствовать о стрессе, вызванном эпигенетическими факторами окружающей среды, который испытывает организм во время физического развития [12]. Рост и развитие кистей человека зависят от способности организма поддерживать гомеостаз при различных генетических и экологических возмущениях. Стабильность развития формирует кисти в их прогнозируемой фенотипической симметричной морфологии [13]. Неспособность организма противостоять генетическим и экологическим стрессорам вызывает отклонения от симметрии, известные как ФА [7]. Интенсивность и продолжительность эпигенетического стресса определяют величину отклонений от идеальной двусторонней симметрии, которая обуславливает ФА [14].

По мнению некоторых исследователей, процессы, приводящие к морфологическому гомеостазу, могут снижать приспособленность, тем самым препятствовать отбору по некоторым признакам, что не благоприятствует отбору, а фенотипическая пластичность носит адаптивный характер [15].

**Выводы.** Таким образом, обнаруженные различия ФА фаланг пальцев кисти указывают на направленный характер в продольной и поперечной оси, что, возможно, обусловлено влиянием половых гормонов на ранних этапах постнатального онтогенеза пальцев кистей и различными функциональными нагрузками. Билатеральная организация рентгеноостеометрических показателей фаланг пальцев кисти человека имеет характер направленной асимметрии, который проявляется в ее относительных и абсолютных показателях. Асимметрия фаланг пальцев носит направленный характер с преобладанием доли лиц с прямой асимметрий, которая независимо от пола увеличивается в ульнарном направлении для проксимальных фаланг и в радиальном направлении для дистальных фаланг в проксимо-дистальном направлении. Средние значения ФА у мужчин были выше, чем у женщин. Величина значений ФА независимо от пола возрастает в радиальном направлении и достигает максимальных значений у фаланг I пальцев, а в проксимо-дистальном направлении – от проксимальных фаланг к дистальным, при этом различия между проксимальными/дистальными фалангами и средними фалангами минимальны.

### Список литературы

1. Zakharov V.M., Trofimov I.E. Fluctuating asymmetry as an indicator of stress. *Emerging Topics in Life Sciences*. 2022. P. ETL20210274. DOI: 10.1042/ETLS20210274.

2. Ноyme Е.Н. Minor anomalies: Diagnostic clues to aberrant human morphogenesis. *Genetica*. 1993. vol. 89. no. 1-3. P. 307-315.
3. Лайус Д.Л., Graham J.H., Католикова М.В., Юрцева А.О. Флуктуирующая асимметрия и случайная фенотипическая изменчивость в популяционных исследованиях: история, достижения, проблемы, перспективы // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. 2009. Сер. 3. Вып. 3. С. 98-110.
4. Хайруллин Р.М. Эффективность индексов флуктуирующей асимметрии для оценки морфологических признаков человека // *Морфологические ведомости*. 2002. № 1-2. С. 52-54.
5. Зорина А.А. Методы статистического анализа флуктуирующей асимметрии // *Принципы экологии*. 2012. Т. 1. № 3. С. 24-47.
6. Webster M. Morphological homeostasis in the fossil record. *Seminars in Cell and Developmental Biology*. 2019. vol. 88. P. 91-104. DOI: 10.1016/j.semcd.2018.05.016.
7. Graham J.H., Ozener B. Fluctuating asymmetry of human populations: a review. *Symmetry*. 2016. vol. 8. P. 154. DOI: 10.3390/sym8120154.
8. Van Dongen S., Cornille R., Lens L. Sex and asymmetry in humans: What is the role of developmental instability? *Journal of Evolutionary Biology*. 2009. vol. 22. P. 612-622. DOI: 10.1111/j.1420-9101.2008.01667.x
9. Arundell K.L., Bojko J., Wedell N., Dunn A.M. Fluctuating asymmetry, parasitism and reproductive fitness in two species of gammarid crustacean. *Diseases of Aquatic Organisms*. 2019. vol. 136. no. 1. P. 37-49. DOI: 10.3354/dao03395.
10. Хайруллин Р.М. Сравнительная билатеральная морфометрическая характеристика пальцев кисти человека // *Морфология*. 2001. Т. 120. № 5. С. 91-95.
11. Ten Broek C.M., Bots J., Varela-Lasheras I., Bugiani M., Galis F., Van Dongen S. Amniotic fluid deficiency and congenital abnormalities both influence fluctuating asymmetry in developing limbs of human deceased fetuses. *PLoS One*. 2013. vol. 8. no. 11. P. e81824. DOI: 10.1371/journal.pone.0081824.
12. Juarez-Carreño S., Morante J., Dominguez M. Systemic signalling and local effectors in developmental stability, body symmetry, and size. *Cell Stress*. 2018. vol. 2. no. 12. P. 340-361. DOI: 10.15698/cst2018.12.167.
13. Mopin C., Chaumoitre K., Signoli M., Adalian P. Developmental stability and environmental stress: A geometric morphometrics analysis of asymmetry in the human femur. *American journal of physical anthropology*. 2018. vol. 167. no. 1. P. 144-160. DOI: 10.1002/ajpa.23613.
14. Breno M., Bots J., De Schaepdrijver L., Van Dongen S. Fluctuating asymmetry as risk marker for stress and structural defects in a toxicologic experiment. *Birth defects research. Part B*,

Developmental and reproductive toxicology. 2013. vol. 98. no. 4. P. 310-317. DOI: 10.1002/bdrb.21067.

15. De Lisle S.P., Mäenpää M.I., Svensson E.I. Phenotypic plasticity is aligned with phenological adaptation on both micro- and macroevolutionary timescales. Ecology Letters. 2022. vol. 25. no. 4. P. 790-801. DOI: 10.1111/ele.13953.