

УДК 572.512.6 + 572.512.823

ЧАСТОТА ЗНАЧЕНИЙ ЧИСЕЛ ФИБОНАЧЧИ В ПРОПОРЦИЯХ КОСТНЫХ СЕГМЕНТОВ КИСТИ РАЗНЫХ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ТИПОВ

Хайруллин Р.М., Ермоленко А.С., Филиппова Е.Н.

ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный университет», Ульяновск, e-mail: khayrullin@list.ru

На стандартных рентгенограммах разных морфологических типов кисти человека исследована частота встречаемости величин отношений длин отдельных костных сегментов пальцев и пястных костей, равных по значениям к числам Фибоначчи или числам тройных отношений (вурфу). Наибольшая частота совпадений индивидуальных значений пропорций сегментов соответствующим эталонным значениям золотой пропорции и вурфу установлена для I и III пальцев независимо от пола и стороны тела. При билатеральном сравнении долей совпадений также наблюдались специфические особенности, связанные с полом. У мужчин для II-го правого луча ульнарного типа кистей доля совпадений была статистически значимо выше, чем для левых. У женщин аналогичные статистически значимые различия противоположной билатеральной направленности выявлены для V луча радиального типа кистей. Половые различия проявились также в долях совпадений значений пропорций лучей кисти со значениями обобщённых p-пропорций для I луча правых кистей радиального типа. У женщин доля совпадений была в семь раз выше, чем у мужчин. По максимальной частоте совпадения соотношений костных сегментов p-пропорциям кисть неопределённого типа характеризуется как оптимальная с позиций биологического совершенства. Подчёркивается, что установленные анатомические закономерности должны учитываться при конструировании экзоскелетов рук и реабилитационного оборудования.

Ключевые слова: кисть человека, числа Фибоначчи

THE FREQUENCY OF FIBONACCI NUMBERS VALUES IN BONE SEGMENTS PROPORTIONS OF DIFFERENT MORPHOLOGICAL TYPES OF HAND

Khairullin R.M., Ermolenko A.S., Filippova E.N.

Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, e-mail: khayrullin@list.ru

The search in human biology for ideal proportions have led to the identification of similar but not equal to their values in many structural and physiological parameters. Many researchers have significantly simplify the true value of irrational ratios in the parameters of living organisms, over-estimate the degree of approximation to their ideal, which in itself contradicts the notion of them as evolving dynamical systems and their principles of optimal organization. On standard radiographs of different morphological types human hands examined the frequency of occurrence values of proportions the lengths of some fingers and metacarpal bones segments are equal in value to the Fibonacci numbers or triple relations (wurf). The highest frequency matches the proportions of individual values of the segments to the reference values the golden ratio and wurf set for I and III fingers corresponding, regardless of sex and body side. When comparing the frequency of bilateral Fibonacci numbers in proportions of hand bone segments were observed specific features related to sex. For II-th ray of the ulnar type right hand of men proportion of matches was significantly higher. In women, similar statistically significant differences opposite direction of bilateral set for V ray of radial type of hand. Also, sex differences in the proportions of matches of values of the proportions of hand rays with the values of the generalized p-ratios appeared only for the I ray the radial type right hand. In women, the proportion of matches was seven times higher than in men. Intermediate type of hand is as optimal from the standpoint of biological perfection described, for it set the maximum frequency of bone segments relationships coincidence to the p-proportions. The authors point out that the established anatomical patterns should be considered when designing hand exoskeletons, and rehabilitation equipment.

Keywords: human hand, Fibonacci numbers

Всегда ли однотипно соотносятся эстетическое совершенство, психофизиологическое восприятие которого человеком реализовано в принципе максимума информации и биологическое совершенство, требующее максимума возможности устойчивости или адаптации в условиях наибольшей неопределённости? Иными словами, сопоставимы ли известные закономерности совершенства эстетического, универсального (принципа максимума информации) с совершенством биологическим? Понятие и критерии совершенства в биологической и медицинской морфологии являются спорными и неоднозначными [3, 5]. Как справедливо отмечает Н.А. Заренков «Значение для биологии проблемы «органической формы»,

скорее всего, завышено» (цит. по [3], с. 14). Поиски идеальных или эталонных пропорций в биологии человека привели к выявлению близких, но не равных им значений во многих структурных и физиологических параметрах, включая параметры, имеющие динамические характеристики [4]. В этом смысле можно говорить о значительном упрощении истинного значения частоты встречаемости иррациональных соотношений в параметрах живых организмов, завышенной оценке степени приближения их к идеальным, что само по себе противоречит представлениям о них, как об эволюционирующих динамических системах, и принципам их оптимальной организации [6]. Кисть человека в этом смысле не осталась

исключением, многие авторы описывают её как высокоорганизованную полисегментарную конструкцию, в которой реализовано максимальное возможное идеальных соотношений сегментов [5, 7].

Наряду с представлениями об универсальном совершенстве существует понятие совершенства биологического. Приоритет во введении в анатомию человека представления о биологическом совершенстве и его причинной обусловленности принадлежит отечественному анатому В.Н. Шевкуненко. Он выделял три вида биологического совершенства анатомических форм: филогенетическое, онтогенетическое и функциональное [8]. Всё многообразие вариантов индивидуальной анатомической изменчивости форм можно свести к трём основным типам: совершенному, переходному и несовершенному. В.Н. Шевкуненко дал примерное распределение этих типов у человека: совершенный тип встречается в 55–60% случаях, переходный в 20–25%, несовершенный – в 15%. В современных популяциях людей распределение трёх известных морфологических типов кисти с учётом полового диморфизма вполне укладываются в рамки этого соотношения [9]. В нашей предыдущей работе мы продемонстрировали значительную степень условности соответствия значений реальных пропорций костных сегментов пальцев кисти человека идеальным, подобным числам Фибоначчи или числам тройных отношений (вурфу) [2]. При этом обнаруженные среднестатистические значения реальных пропорций оказались отличающимися по значениям от идеальных и могут быть в большинстве случаев отнесены к иррациональным числам более высокого порядка, что может поставить под сомнение наличие их в биологических структурах вообще. Среднестатистические значения в биологии не в полной мере отражают объективно существующие распределения реальных значений, для подавляющего большинства биологических систем, отличающихся от нормального, гауссовского. Отсюда следует, что выяснение частоты (доли) встречаемости значений пропорций, равных числам Фибоначчи, может дать более объективную картину реальности их наличия в сегментированных биологических структурах. Вполне вероятно, что разные, с биологической точки зрения, по степени совершенства типы кисти могут иметь разную частоту совпадений пропорций их костных сегментов с эталонными.

Целью настоящего исследования явилось установление частоты совпадений значений соотношений длин костных сегментов лучей кистей разных морфологических

типов инвариантным значениям золотых пропорций с учётом фактора полового диморфизма.

Материал и методы исследования

Настоящее исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-04-99059). Объектом исследования послужили 200 рентгенограммы кисти (100 мужских и 100 женских), полученные в лечебных, протезно-ортопедических и иных учреждениях, независимо от целей и задач настоящего исследования, в диагностических и идентификационных целях для определения возможной патологии мягких тканей и костно-суставного аппарата верхней конечности и в которых таковая не была обнаружена. Все рентгенограммы были предоставлены в распоряжение авторов после обязательной деперсонализации индивидуальных данных за исключением возраста и пола обследуемого, что не противоречит законодательству РФ, российским и международным этическим нормам и правилам проведения исследований на животных и человеке. Средний возраст мужского контингента составил $46,3 \pm 1,1$ лет ($M \pm m$), женского – $49,2 \pm 0,9$ лет ($M \pm m$). Рентгенография кистей с захватом лучезапястных суставов проводилась со стандартными режимами настройки, расстояние от источника рентгеновского излучения до объекта исследования соответствовало – 90 см, как описано в нашей предыдущей работе [2]. Кисть располагалась над рентгеновской плёнкой, размещённой в светонепроницаемом конверте в нейтральном положении с ладонью, обращённой книзу. Центральный луч рентгеновской трубки ориентировался перпендикулярно к запястно-пястному суставу III пальца. Морфометрия рентгенограмм, которая включала измерение костной длины пястных костей и фаланг пальцев I–V лучей кисти проводилась калипер-циркулем фирмы Rosscraft (США) с точностью $\Delta = 0,01$ мм. Золотую пропорцию II–V пальцев кисти характеризовали вурфом (W), который был определён для каждого пальца по формуле: $W = [(DF + MF) \cdot (MF + PF)] / [(DF + MF + PF) \cdot MF]$, где DF – длина ногтевой фаланги; MF – длина средней фаланги; PF – длина проксимальной фаланги. Морфологический тип кисти определялся разницей выступания кончиков II и IV пальцев, определяемой относительно линии, перпендикулярной продольной оси руки [1]. При выступании кончика указательного пальца более, чем на 0,5 мм по сравнению с безымянным, тип кисти считался лучевым или радиальным (R). При равенстве длин пальцев, тип кисти считался промежуточным (I), в случае выступания кончика безымянного пальца относительно кончика указательного более чем на 0,5 мм, тип кисти определяли как локтевой или ульнарный (U). Для костных лучей кисти и её I пальца золотую пропорцию (Φ) определяли отношением меньшей части (пястной кости; дистальной фаланги I пальца) к большей (длине пальца; длине проксимальной фаланги). Статистическую значимость различий долей сравниваемых выборок определяли в рамках соответствующих опций лицензионной программы Statistica 6.0 (StatSoft, США) с использованием одностороннего критерия.

Результаты исследования и их обсуждение

С целью выявления связи между золотыми пропорциями костных лучей и морфоло-

гическим типом кисти проведён анализ числа совпадений их наблюдаемых значений, равных числам Фибоначчи различного порядка, с величинами обобщённых *p*-пропорций (табл. 1). По результатам анализа установлено, что наибольший процент совпадений наблюдается для кистей неопределённого типа (с одинаковой длиной дистальных кончиков II и IV пальцев) независимо от пола и стороны тела: 11–33% (мужские кисти), 7–50% (женские кисти). Закономерности распределения совпадений наблюдаемых пропорций с обобщёнными *p*-пропорциями

для ульнарного и радиального типов кисти соответствуют половому диморфизму структуры распределения этих типов. У мужчин наибольшие частоты совпадения установлены для ульнарного (мужского) типа кистей, у женщин – для радиального (женского) типа кистей. Однако в женских кистях совокупный процент совпадений выше. Независимо от пола и типа кисти наименьшее количество совпадений выявлено для III луча (мужские кисти – 2,99–16,67%, женские – 3,13–5,25%) и IV луча (мужские – 3,51–12,5%, женские – 2,63–10%).

Таблица 1

Частота совпадений наблюдаемых значений соотношений I–V костных лучей кисти со значениями обобщённых *p*-пропорций, %

Пол	Тип кисти	Сторона тела	Лучи кисти, $P \pm s_p$ (n)				
			I	II	III	IV	V
Мужской	U	Правая	24,24 ± 4,51 (66)	30,16 ± 4,94 (63)	2,99 ± 1,71 (67)	–	4,48 ± 2,08 (67)
		Левая	23,33 ± 4,48 (60)	16,95 ± 3,91 (59)	3,33 ± 1,81 (60)	3,51 ± 1,85 (57)	5,08 ± 2,22 (59)
	R	Правая	5,26 ± 2,28 (19)	10,53 ± 3,21 (19)	–	–	15,79 ± 3,91 (19)
		Левая	12,50 ± 3,50 (16)	18,75 ± 4,26 (16)	13,33 ± 3,61 (15)	12,50 ± 3,50 (16)	–
	I	Правая	33,33 ± 5,67 (9)	22,22 ± 4,67 (9)	–	–	11,11 ± 3,32 (9)
		Левая	–	–	16,67 ± 4,06 (6)	–	16,67 ± 4,06 (6)
Женский	U	Правая	31,25 ± 5,30 (32)	31,25 ± 5,30 (32)	3,13 ± 1,76 (32)	–	9,38 ± 3,02 (32)
		Левая	22,22 ± 4,57 (27)	20,00 ± 4,36 (25)	3,57 ± 1,88 (28)	7,41 ± 2,69 (27)	7,14 ± 2,65 (28)
	R	Правая	37,5 ± 5,65 (40)	9,09 ± 2,97 (33)	–	–	7,32 ± 2,66 (41)
		Левая	34,29 ± 5,49 (35)	22,22 ± 4,52 (36)	5,26 ± 2,27 (38)	2,63 ± 1,61 (38)	21,95 ± 4,47 (41)
	I	Правая	50,00 ± 6,89 (10)	12,50 ± 3,52 (8)	–	10,00 ± 3,146 (10)	–
		Левая	50,00 ± 6,86 (12)	–	–	–	7,14 ± 2,66 (14)

При билатеральном сравнении долей совпадений также наблюдались специфические особенности, связанные с полом: у мужчин для II правого луча ульнарного типа кистей доля совпадений достоверно выше (30,16%), чем для левых (16,95%, $p < 0,047$). У женщин аналогичные статистически значимые различия противоположной билатеральной направленности выявлены для V луча радиального типа кистей, 7,32% совпадений на правых и 21,95% на левых ($p < 0,0286$).

Билатеральные полоспецифичные различия ярко проявились и при анализе различий долей совпадений на одноимённых лучах разных морфологических типов кисти у представителей одного пола. Согласно по-

лученным результатам у мужчин такие различия присущи I, II и V лучам правой кисти. На I правых лучах процент совпадений выше на ульнарного типа кистях, чем радиального (24,24% и 5,26% соответственно, $p < 0,0352$), на промежуточного типа кистях выше, чем радиальных (33,33 и 5,26%, $p < 0,0284$). Для II правого луча доля встречаемости совпадений на ульнарных кистях была выше в три раза, чем радиальных (30,16 и 10,53%, $p < 0,0414$). На V правом луче наблюдаются различия противоположной направленности, доля совпадений на ульнарных кистях достоверно меньше, чем радиальных (4,48 и 15,79%, соответственно, $p < 0,0337$).

У женщин анализ различий долей совпадений на одноимённых лучах разных морфологических типов кисти выявил их на II луче правых кистей, а также на I и V лучах левых кистей. На II луче правых ультнарных кистей обнаружено большее число совпадений, чем радиальных (31,25 и 9,09% соответственно, $p < 0,0153$), на I луче левых кистей аналогичные различия для типов кисти составили 50,0 и 22,22% ($p < 0,0441$, табл. 1). В отличие от мужчин, у женщин различия противоположной направленности наблюдались на V левом луче, доля совпадений на ультнарных кистях достоверно меньше, чем радиальных (7,14 и 21,95%, соответственно, $p < 0,0495$). Половые различия в долях совпадений значений пропорций лучей кисти со значениями обобщённых r -пропорций проявились только

для I луча правых кистей радиального типа (см. табл. 1). У женщин доля совпадений была в семь раз выше, чем у мужчин (37,5 и 5,26% соответственно, $p < 0,0059$).

При анализе соотношений костных сегментов пальцев наибольший процент совпадений их значений с соответствующими эталонными значениями золотой пропорции и вурфа установлен для I и III пальцев независимо от пола и стороны тела. Формула соотношений частоты таких совпадений по типам кисти имеет вид: $R > U > N$, в женских кистях процент совпадений выше. Наименьшая доля совпадений установлена для II и V пальцев правых мужских кистей (табл. 2). У женщин на II и V пальцах независимо от стороны тела и типа кисти совпадений не обнаружено вообще.

Таблица 2

Частота совпадений наблюдаемых значений соотношений костных сегментов пальцев кисти с соответствующими эталонными значениями золотого сечения (для I пальца) и вурфа (для II–V пальцев), %

Пол	Тип кисти	Сторона тела	Пальцы кисти, $P \pm s_p (n)$				
			I	II	III	IV	V
Мужской	U	Правая	12,12 ± 3,34 (66)	1,49 ± 1,22 (67)	–	11,94 ± 3,31 (67)	1,49 ± 1,22 (67)
		Левая	21,67 ± 4,34 (60)	–	11,67 ± 3,29 (60)	8,33 ± 2,81 (60)	–
	R	Правая	26,32 ± 5,00 (19)	5,26 ± 2,283 (19)	26,32 ± 5,00 (19)	10,53 ± 3,21 (19)	–
		Левая	18,75 ± 4,26 (16)	–	25,00 ± 4,90 (16)	12,50 ± 3,50 (16)	–
	I	Правая	11,11 ± 3,32 (9)	–	22,22 ± 4,67 (9)	–	–
		Левая	14,29 ± 3,76 (7)	–	14,29 ± 3,76 (7)	–	–
Женский	U	Правая	10,00 ± 3,13 (20)	–	25,00 ± 4,87 (20)	35,00 ± 5,70 (20)	–
		Левая	31,25 ± 5,45 (16)	–	31,25 ± 5,449 (16)	12,50 ± 3,50 (16)	–
	R	Правая	21,88 ± 4,51 (32)	–	15,63 ± 3,853 (32)	12,50 ± 3,46 (32)	–
		Левая	6,45 ± 2,51 (31)	–	29,03 ± 5,14 (31)	9,68 ± 3,06 (31)	–
	I	Правая	10,00 ± 3,15 (10)	–	10,00 ± 3,146 (10)	–	–
		Левая	7,14 ± 2,66 (14)	–	42,86 ± 6,347 (14)	7,14 ± 2,66 (14)	–

В отличие от костных лучей в соотношениях сегментов пальцев не наблюдается выраженных от пола или типа кисти закономерностей распределения числа их совпадений с обобщёнными r -пропорциями. В мужских кистях как билатеральные, так и зависимые от морфологического типа кисти различия в частотах совпадений наблюдаемых и эталонных значений r -пропорций

отсутствовали (см. табл. 2). Статистически значимые билатеральные различия в частоте совпадений для женщин были присутствии только кистям радиального типа для I ($p < 0,0428$) и III ($p < 0,0468$) пальцев, на правых пальцах процент совпадений при этом был статистически значимо выше, чем на левых. Различия в частоте совпадений в зависимости от типа кисти проявились

у женщин на I и 4 пальцах. При этом на I левом пальце процент совпадений на ульнарного типа кистях (31,25%) выше, чем на радиальных (6,45%, $p < 0,0129$), а на IV правых пальцах аналогичные различия составляют 35 и 12,5% ($p < 0,0330$, табл. 2). Половые различия по частоте совпадений пропорций костных пальцевых сегментов были нами обнаружены на ульнарного типа кистях. На III пальцах левых кистей у мужчин доля совпадений в три раза ниже, чем у женщин (11,67 и 31,25%, $p < 0,0262$), IV пальцах правых кистей аналогичные отношения составили 11,94 и 35% ($p < 0,0096$, см. табл. 2).

Установленный в настоящем исследовании наибольший процент совпадений р-пропорций для кистей промежуточного типа характеризует последний как наиболее оптимальный с позиции биологического совершенства. Это промежуточный тип кисти между двумя её основными типами – ульнарным, преобладающим по частоте встречаемости у мужчин, и радиальным, преобладающим у женщин. Нельзя при этом исключить определённую вероятность того, что кинематика промежуточного типа кисти при равенстве внешней, выступающей за пределы кисти длины билатерально симметричных лучей более рациональна с функциональной, механической точки зрения. Нелинейный характер распределения показателей золотой пропорции для пальцев обусловлен, на наш взгляд, реализацией функции захвата (*grasping*), а наиболее близкие к вурфу значения ($\approx 1,31$), выявленные для III пальцев [2], характеризуют последние, как наиболее оптимальные кинематические блоки в реализации *grasping*-механизма кисти. Более высокая частота совпадений сегментов лучей и пальцев кисти с эталонными значениями золотого сечения и вурфа у женщин, вероятно, объясняется большей «забуференностью» морфогенеза женского организма по сравнению с мужским организмом. В функциональном, кинематическом и эстетическом аспектах радиальный тип кисти является более совершенным, эволюционно устойчивым [1]. Однако реальная частота встречаемости инвариантных пропорций костных сегментов в кистях промежуточного типа намного выше, чем радиальных. Таким образом, в результате проведённого нами исследования следует признать, что однозначного соответствия оптимальности (преобладания) типа анатомической конструкции кисти идеальным, с точки зрения организации формы, пропорциям её сегментов не существует.

Существенное значение установленные нами закономерности могут иметь

при конструировании экзоскелетов, призванных обеспечить максимально эффективную реабилитацию постинсультных пациентов, их инженерные решения должны опираться на фундаментальные закономерности структурной организации частей тела, обеспечивающих как общую, так и частную локомоцию [10]. Эффективность максимально приближённых к реальной биологической форме конструкций (но не идеальных с точки зрения универсальных пропорций) с эргономической точки зрения может быть намного большей с учётом эволюционно выработанной устоявшейся системы пространственно-временной организации сигналов их управления. Особенностью живых систем является высокая пластичность морфогенеза, подверженно-го влиянию значительного числа внешних и внутренних факторов (в особенности – костного скелета) и явления соотносительной изменчивости, что также требует учёта в конструировании кибернетических аналогов кисти.

Обобщая результаты настоящего и предыдущего исследований, следует отметить, что в целом, существующие в научной литературе представления о высокой частоте совпадения значений соотношений костных или сгибательных, функциональных сегментов пальцев и кисти золотым пропорциям не соответствуют реальной действительности. Как видно из результатов настоящего исследования, на некоторых лучах они встречаются чрезвычайно редко, на некоторых отсутствуют (II, IV и V лучи). Наблюдаются чётко выраженные различия в степени приближения соотношений костных сегментов лучей и пальцев к идеальным в зависимости от пола и преобладающего у его представителей морфологического типа кисти. Распределения этих соотношений с учётом билатеральной организации руки близки к зеркальным (обратной симметрии), в том числе и в пределах самой кисти, в ульнарно-радиальном градиенте относительно центра её симметрии – III луча. Очевидно, что не в последнюю очередь это явление обусловлено наличием у человека межполушарной двигательной асимметрии. Полученные нами результаты должны быть учтены при конструировании в ближайшем будущем гендерно-специфичной робототехники, для того чтобы совершенство биологических структур не было принесено в жертву совершенству инженерных решений их воплощения, а последние были максимально эффективными.

Авторы благодарят РФФИ за финансовую поддержку исследования, результаты которого изложены в настоящей статье.

Авторы заявляют об отсутствии каких бы то ни было конфликтов интересов с кем бы, то ни было в отношении идеи, планирования, выполнения и опубликования результатов настоящего исследования и их последующего использования в коммерческих или иных целях.

Список литературы

1. Волоцкой М.В. Новый способ антропологической характеристики дистального профиля кисти // Антропологический журнал. – 1932. – № 1. – С. 113–117.
2. Ермоленко А.С., Хайруллин Ф.Р., Хайруллин Р.М. Значения чисел Фибоначчи в соотношениях костных сегментов кисти человека // Фундаментальные исследования. – 2011. – № 9. – С. 241–244.
3. Заренков Н.А. Биосимметрия. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 320с.
4. Код Фибоначчи и «золотое сечение» в патофизиологии и экспериментальной магнитобиологии / Н.М. Исаева, Т.И. Субботина, А.А. Хадарцев, А.А. Яшин; под ред. Т.И. Субботиной и А.А. Яшина. – М., Тула, Тверь: ООО Изд-во «Триада», 2007. – 136 с.
5. Петухов С.В. Биомеханика, бионика и симметрия. – М.: Наука, 1981. – 240 с.
6. Розен Р. Принцип оптимальности в биологии: пер. с англ. – М.: Мир, 1969. – 215 с.
7. Шапаренко П.Ф. Принцип пропорциональности в соматогенезе. – Винница: б. и., 1994. – 225 с.
8. Шевкуненко В.Н. Типовая и возрастная анатомия. – Л.: ВМА им. С.М. Кирова, 1925. – 141 с.
9. Хайруллин Р.М. Морфологические типы кисти в юношеском периоде индивидуального развития // Российские морфологические ведомости. – 2001. – № 1–2. – С. 103–105.
10. Development and pilot testing of HEXORR: hand EXOskeleton rehabilitation robot / C.N. Schabowsky, S.B. Godfrey, R.J. Holley, P.S. Lum // J. Neuroeng. Rehabil. – 2010. – Issue 28. – P. 7–36.

Рецензенты:

Музурова Л.В., д.м.н., профессор, профессор кафедры анатомии человека ГОУ ВПО «Саратовский ГМУ им. В.И. Разумовского», г. Саратов;

Маслякова Г.Н., д.м.н., профессор, зав. кафедрой патологической анатомии ГОУ ВПО «Саратовский ГМУ им. В.И. Разумовского», г. Саратов.

Работа поступила в редакцию 09.09.2011.