

Зайченко А.А.

Конструкционная морфология мозгового черепа человека

ГБОУ ВПО Саратовский ГМУ им. В.И. Разумовского Минздрава России

Zaichenko A.A.

Constructional morphology of human cerebral cranium

Saratov State Medical University n.a. V.I. Razumovsky

Резюме

Цель: изучение изменчивости морфогометрических параметров, определяющих биомеханическую устойчивость мозгового черепа человека к внешним механическим воздействиям и разработка его конструкционно-морфологической типологии. **Методы:** 819 черепов людей и женщин разного возраста, чья смерть не была связана с черепно-мозговыми травмами или системными заболеваниями скелета, а также рентгенограммы черепов. Методической основой явился подход к мозговому черепу как трехслойной оболочке (роль наружных слоев выполняют компактные пластинки, в роли заполнителя выступает диплоэ), жестко закрепленной по краю основания черепа, приближающейся по форме к половине эллипсоида вращения или к полусфере с различной степенью пологости, переменной толщиной и осями переменной величины (основные диаметры черепа). Тип конструкционной устойчивости – это объективно существующий комплекс адаптивных морфогометрических параметров, являющихся интегральными показателями размеров и формы мозгового черепа (диаметры), макроструктуры (толщина костей, компактных пластинок и диплоэ), определяющих его конструкционную устойчивость к внешним механическим воздействиям (краниотип). **Результаты.** Выделены следующие краниотипы: 1) морфологически-устойчивый, с большой толщиной кости и малыми диаметрами; 2) структурно-устойчивый, с большой толщиной кости и большими диаметрами; 3) конфигурационно-устойчивый, с малыми диаметрами и малой толщиной кости; 4) морфологически-неустойчивый, с малой толщиной кости и большими диаметрами.

Ключевые слова: череп, конструкционная морфология, краниотипы

Abstract

The aim of the present work was to study the variations in the morphogeometrical parameters determining the biomechanical stability of the human cranium to external mechanical influences and to develop its morphological constructional typology. **Methods.** Under investigation were 819 human crania of men and women belonging to different age groups, whose death was not associated with cerebral traumas or systemic diseases of the skeleton as well as X-ray films of those crania. The study is based on the approach to the cerebral cranium as a gently sloping, strictly convex three-layer shell (the compact lamina acts as the outer layers and the diploe makes up for the filling), rigidly fixed along the edge of the skull basement with its form being close to a half of an ellipsoid with variable axes (main diameters of the cranium). The constructional type of human cerebral cranium is an objectively existing complex of morpho-geometrical indices of its constituent bones structure, configuration and size, reflecting the stability to external, primarily mechanical, influences. **Results.** The following are the constitutional types of the human cerebral cranium (craniotypes): 1) the structurally stable type, which is characterized by a great bone thickness along with large radii of curvature; 2) the configurationally stable type, which is characterized by a small bone thickness along with smaller radii of curvature; 3) the morphologically stable type, wherein the stability is provided by a greater bone thickness or an optimal correlation between the different laminae, as well as by smaller radii of curvature; 4) the morphologically unstable type with smaller bone thickness and greater radii of curvature.

Key words: cranium, constructional morphology, craniotypes

Введение

Традиционные типологии и способы описания формы черепа человека основаны на использовании метода индексов или уподоблении его формы геометрическим телам. Метод индексов подвергается давней и обоснованной критике антропологов. Описание и классификация путем уподобления геометрическим телам применяется относительно редко, так как излишне схематизирует форму черепа, страдает субъективностью и фактически характеризует только свод черепа (чаще всего в вертикальной норме). Ни одна из существующих типологий не учитывает основную функцию мозгового черепа – защиту головного мозга от внешних, прежде всего механических, воздействий. Признаки мозгового черепа не включаются в большинство современных конституциональных схем. В связи с этим представляется, что разработка типологии мозгового черепа на основании комплекса морфогометрических параметров, определяющих его конструкционную устойчивость как оболочки, защищающей головной мозг от внешних механических воздействий, является актуальной краниологической проблемой анатомии, антропологии, нейрохирургии и судебной медицины.

Цель: изучение изменчивости морфогометрических параметров, определяющих биомеханическую устойчивость мозгового черепа человека к внешним механическим воздействиям и разработка его конструкционно-морфологической типологии.

Материал и методы

Материалом исследования служили 719 сводов черепа лиц мужского и женского пола в возрасте 1 дня до 92 лет (мужские черепа) и до 105 лет (женские черепа) без признаков механических повреждений и системных заболеваний скелета, а также

рентгенограммы этих сводов в аксиальной проекции. Все черепа принадлежат представителям населения Среднего и Нижнего Поволжья, проживавшим на этой территории с начала по конец XX века. Исследованы 100 сводов черепа плодов теменно-пятюточной длиной 23-41 см (16-36 недель внутриутробного развития). Из 819 сводов 250 представляют собой фронтальные распилы, выполненные на 10 стандартных уровнях, и 150 – тотальные шлифы. Материалом исследования служили также обзорные рентгенограммы черепа, выполненные в прямой передней и боковой проекциях, 80 больных, поступивших в приемное отделение 1-й городской больницы г. Саратова по поводу полученной черепно-мозговой травмы.

Анализировали сканированные изображения черепов, на которых отмечали гомотопичные точки, а компьютерные преобразования производили с помощью программного обеспечения «Video Craft GIF Animator». Производили сглаживание контура мозгового черепа программным путем. Программное обеспечение «3D Studio MAX» было использовано с целью создания трехмерных моделей отделов мозгового черепа человека. Использовали краниотригонометрическую программу. В качестве наиболее близкой аппроксимации формы мозгового черепа выбраны срединные поверхности половины эллипсоида вращения, а также сферических куполов разной степени пологости.

Методической основой выделения типов конструкционной устойчивости мозгового черепа человека явился подход к мозговому черепу как трехслойной оболочке (роль наружных слоев выполняют компактные пластинки, а в роли заполнителя выступает диплоз), жестко закрепленной по краю основания черепа, приближающейся по форме к половине эллипсоида вращения или к полусфере с различной степенью пологости, переменной толщиной и осями переменной величины (основные диаметры черепа) [1, 2]. На основании этих морфогеометрических параметров рассчитан морфологический показатель устойчивости (МПУ) мозгового черепа: $M\text{П}\text{У}=400TK^2/D_1D_2$, где TK – толщина костей (мм), D_1 и D_2 – соответственно продольный и поперечный диаметры черепа (мм). При подходе к мозговому черепу как трехслойной оболочке, в которой роль наружных слоев выполняют компактные пластинки, а в качестве заполнителя выступает диплоз, $M\text{П}\text{У}=100[4(TH+TB)^2+2TD(D_1+D_2)]/D_1D_2$, где TH – толщина наружной компактной пластинки (мм), TB – толщина внутренней компактной пластинки (мм), TD – толщина диплоза (мм), D_1 и D_2 – соответственно продольный и поперечный диаметры черепа (мм).

Для исследования изменчивости толщины костей, диплоза, наружной и внутренней пластинок использовали бинокулярную стереоскопическую лупу МБС-2 с окулярной линейкой-вставкой. С целью объективизации характеристики макроструктуры диплоза применялся стереометрический анализ. Оценка флуктуирующей асимметрии осуществлялась с использованием величины соответствующей дисперсии.

Результаты

Преобразование (морфинг) узловых линий модели Тьюринга для эллипса в границы эмбриональных компонентов мозгового черепа позвоночных, выполненное с помощью программного обеспечения «Video Craft GIF Animator» позволило выявить соответствие закономерностей формирования его основных отделов (переднего клиновидно-решетчатого, образующегося за счет окостенения эмбриональных трабекулярных хрящей, и заднего, затылочно-ушного, образующегося за счет окостенения эмбриональных парахордальных хрящей и ушных капсул) этой модели. Сопоставление компартментов модели Тьюринга, эмбриональных компонентов мозгового черепа позвоночных и костных пластин пластронов черепах демонстрируют универсальность модели Тьюринга для эллипса в описании подобных биологических конструкций.

С помощью программного обеспечения «3DStudio MAX» составлены картоиды (чертежи-схемы) трабекулярного (клиновидно-решетчатого) и парахордального (затылочно-ушного) отделов мозгового черепа человека и их трехмерная модель [3]. Показано, что минимальной изменчивостью в мозговом черепе обладает точка, расположенная между этими отделами в срединной плоскости, которая в дефинитивном строении черепа лежит на отрезке, соединяющем круглые отверстия. По средним арифметическим значениям стереотопометрических координат краниометрических точек построена схема сагиттальной проекции мозгового черепа, которая объединена с краниотригонометрической схемой, что позволило дать наиболее полную характеристику формы мозгового черепа в латеральной норме. Выявлена положительная связь изменчивости неотенических признаков мозгового черепа человека – угла изгиба основания черепа и угла плоскости большого отверстия с франкфуртской горизонталью [4]. Обнаружена отрицательная связь величины угла плоскости большого отверстия с возрастом.

Реконструкция изменчивости мозгового черепа в антропогенезе, осуществлена путем преобразования сагиттальных обводов черепов шимпанзе, австралопитека KNM-ER 406, синантропа 11 и Схул 5 [5]. Выраженное преобладание высоты свода черепа по Швальбе от линии глабелла-инион в черепах австралопитека и синантропа по сравнению с черепом шимпанзе может быть обусловлено различиями строения затылочной области, связанными с вертикализацией тела: в черепах австралопитека и синантропа точка инион расположена ниже, чем в черепе шимпанзе. Сагиттальные обводы мозгового черепа синантропа и черепа Схул 5 отличаются общими размерами (главным образом, высотой мозгового черепа) и положением лобной чешуи, что отражает адаптивное увеличение объема головного мозга и изменение его формы (развитие лобных долей) на этом этапе антропогенеза, тогда как различия затылочной области невелики.

Результатом анализа формы мозгового черепа человека с помощью линейной и параболической интерполяций явился вывод о том, что в качестве наиболее близкой аппроксимации формы (модели) мозгового черепа могут быть выбраны срединные поверхности половины эллипсоидов вращения и сферических куполов разной степени пологости вплоть до полного сферического купола (полусферы). С использованием пологих сферических куполов достигается наиболее адекватная аппроксимация сагиттальных и фронтальных контуров мозгового черепа шимпанзе, австралопитека, архантропов и части палеоантропов. В свою очередь у протокреманийцев и неоантропов в качестве наиболее адекватной модели выступают полный сферический купол и купола, очерченные по половине эллипсоидальных поверхностей. С позиций теории оболочек принципиальные различия воздействия этих куполов на опорную конструкцию связаны с наличием (у пологих сферических куполов) и отсутствием (у полного сферического купола и купола, очерченного по половине эллипсоидальной поверхности) горизонтальной составляющей силы воздействия. В качестве опорного кольца, работающего на растяжение («воспринимание распора») в черепах шимпанзе, австралопитеков, архантропов и части палеоантропов выступают надглазничный и затылочный валики, на выраженность которых влияет величина продольного диаметра черепа и высота его свода. Происходящее в антропогенезе увеличение высоты мозгового черепа и изменение его конфигурации с формы пологого сферического купола на форму полного сферического купола (или

купола, очерченного по половине эллипсоидальной поверхности) приводит сначала к уменьшению распора, а затем – и к исчезновению выступающих в роли опорного кольца, надглазничного и затылочного валиков.

Исследование изменчивости толщины костей мозгового черепа в антропогенезе включало сглаживание изменений толщины костей по методу наименьших квадратов и по экспоненте, а также регрессионный анализ толщины костей мозгового черепа и абсолютного возраста гоминид. Средняя толщина костей мозгового черепа гоминид [6] составляет 6,60 мм и колеблется от 9,47 у синантропов до 4,77 мм в черепах из Солютре. Для определения средней толщины костей мозгового черепа (ТК, мм) по абсолютному возрасту (АВ, тыс. лет) ископаемой находки предлагается следующее уравнение прямолинейной регрессии: $TK=0,01AB+6,2\pm 1$ (мм). Исходя из величины коэффициента прямолинейной регрессии (0,01 мм), можно сделать заключение о «скорости грацилизации» костей мозгового черепа: в течение каждых десяти тысячелетий толщина костей мозгового черепа уменьшалась в среднем на 0,1 мм (или на 1 мм каждые 100 тыс. лет) и стала меньше почти в 2 раза (9,47 мм у синантропов и 4,77 мм в черепах из Солютре). При известном абсолютном возрасте ископаемой находки можно установить ожидаемую среднюю толщину костей мозгового черепа с точностью до 1 мм. При этом, если реальная толщина костей превышает ожидаемую, то кости мозгового черепа могут быть охарактеризованы как матуризованные и, наоборот, если реальная средняя толщина меньше ожидаемой, то это может свидетельствовать о грацилизации костей мозгового черепа.

В онтогенезе диаметры черепа мужчин завершают рост к первому периоду зрелого возраста, тогда как диаметры черепа женщин, менее значительно увеличиваясь в первые двадцать лет, продолжают расти и в первом периоде зрелого возраста. Обнаружена достоверная положительная связь продольного диаметра со степенью зубчатости ламбдовидного и венечного швов, а поперечного диаметра – со степенью зубчатости сагиттального шва. Степень облитерации швов, прежде всего на внутренней поверхности мозгового черепа, увеличивается с ростом толщины диплоэ и общей толщины костей. Онтогенетические изменения общей толщины костей мозгового черепа и диплоэ аппроксимированы функциями асимптотического роста, отражающими закономерность уменьшения скорости нарастания толщины с возрастом. Возрастная динамика толщины компактных пластинок аппроксимирована параболическими функциями с одним максимумом, которые отражают закономерность увеличения их толщины к зрелому возрасту и дальнейшего уменьшения.

Отмечена минимальная флуктуирующая асимметрия толщины внутренней компактной пластинки, что может свидетельствовать об уменьшении степени влияния стрессовых факторов на макроструктуру костей «снаружи внутрь». Толщина кости на уровне глабелла-опистокранион не связана со средней толщиной кости. Возрастное увеличение толщины кости на этом уровне в черепе женщин происходит за счет размеров полости черепа, тогда как в черепе мужчин направлено «вовне», обуславливая в значительной степени величину продольного диаметра.

На основании исследованных морфогометрических параметров конструкционной устойчивости мозгового черепа – продольного и поперечного диаметров, толщины кости, компактных пластинок и диплоэ – разработана конструкционная типология мозгового черепа и проведено краниотипирование, то есть выделение типов конструкционной устойчивости мозгового черепа человека к внешним механическим воздействиям (краниотипов). Выделение градаций параметров проводили, исходя из формирования средней группы, включающей черепа с параметрами $M\pm 0,67\sigma$, как это принято в конституциональных исследованиях, и $M\pm 0,55\sigma$, как это принято в краниологии. Последний критерий представляется более предпочтительным, так как делает результаты сопоставимыми с данными В.П. Алексеева и Г.Ф. Дебеца [7]. Выделены следующие типы конструкционной устойчивости мозгового черепа (краниотипы): **структурно-устойчивый** тип с большой толщиной кости и большими радиусами кривизны, в котором устойчивость обеспечивается большой толщиной кости или оптимальным соотношением толщины компактных пластинок и диплоэ; **конфигурационно-устойчивый** тип с малой толщиной кости и малыми радиусами кривизны, в котором устойчивость определяется малыми радиусами кривизны; **морфологически-устойчивый** тип, в котором устойчивость обеспечивается как большой толщиной кости или оптимальным соотношением слоев, так и малыми радиусами кривизны; **морфологически-неустойчивый** тип с малой толщиной кости и большими радиусами кривизны [8].

Разработанная конструкционная типология мозгового черепа соответствует, с одной стороны, представлениям о том, что морфологический тип черепа в наибольшей степени определяется его главными размерами, а с другой стороны, согласуется с данными о зависимости прочности мозгового черепа от его формы, связи частоты костной травмы с толщиной костей мозгового черепа, зависимости устойчивости мозгового черепа от трехслойной «сэндвичеобразной» структуры его костей. Если эволюционные преобразования, приводящие к расовой и популяционной изменчивости мозгового черепа человека, связаны с адаптацией к постепенно и постоянно действующим слабым влияниям, зависящим от географических условий ареала, то эволюционные преобразования мозгового черепа как конструкции, защищающей головной мозг от внешних механических воздействий, возникают в результате адаптации к экстремальным элиминирующим факторам, действующим панюкуменно (травма). Это находит отражение в преобразованиях черепа, происходящих после прекращения действия отбора по объему мозга в условиях постоянства климато-географических факторов, и свидетельствует об относительной независимости формирования расовых (популяционных) и конструкционных особенностей мозгового черепа: краниотип представляет собой панюкуменный адаптивный тип, проявляющийся независимо от этноса, расы или условий существования популяций. Конструкционная устойчивость мозгового черепа человека подчиняется действию стабилизирующего отбора, результатом которого является элиминация морфологически неустойчивого краниотипа с большими радиусами кривизны и малой толщиной костей. То есть, внешние механические воздействия являются фактором отбора, определяющим селективные преимущества трех других краниотипов по сравнению с морфологически-неустойчивым. В онтогенезе прослеживается общая тенденция изменения устойчивости черепа от конфигурационной, обусловленной малыми радиусами кривизны, к структурной, обусловленной большой толщиной костей [9].

Обсуждение

Исходные для позвоночных отделы мозгового черепа являются результатом морфогенеза подобных биологических конструкций посредством последовательных делений эмбрионального поля, предсказанных моделью Тьюринга для эллипса. Минимальной изменчивостью в мозговом черепе обладает точка, расположенная между клиновидно-решетчатым

(трабекулярным) и затылочно-ушным (парахордальным) отделами в срединной плоскости на отрезке, соединяющем два круглых отверстия, которая может быть рекомендована в качестве центрирующей в краниологических исследованиях.

Ведущая тенденция преобразований мозгового черепа в антропогенезе, представляя собой компромиссную оптимизацию оболочки, направлена к грацильным черепам «полюса сферы», то есть высоким брахикранным формам, обеспечивающим максимальную емкость и высокую конструкционную устойчивость при минимальных затратах материала. Она проходит между эволюционными векторами, направленными либо к черепам с высокой конструкционной устойчивостью (не соответствующим ведущему адаптивному принципу минимизации массы за счет своей выраженной матуризации), либо к черепам с большой емкостью (не имеющей на стадии палеоантропа и неантропа селективной значимости).

Выраженность толщины кости на уровне глабелла-опистокранион, проявляясь в степени развития надглазничного и затылочного рельефа и находясь в зависимости от величины горизонтальной составляющей силы воздействия свода черепа на кости лица и основание черепа, уменьшается в соответствии с принципом минимизации массы при увеличении высоты свода (сферизации) черепа или приближении его формы к половине эллипсоида вращения.

Подчиняясь закону нормального распределения и варьируя независимо друг от друга, показатели конфигурационной устойчивости связаны с показателями структурной устойчивости посредством швов. Чем выше зубчатость шва и, тем самым, площадь контакта костей, тем больше диаметр, зависящий от аппозиции костной ткани в этом шве, которая, в свою очередь, связана с макроструктурой костей: степень облитерации швов, прежде всего на внутренней поверхности свода черепа, увеличивается с ростом толщины диплоэ и общей толщины кости.

Основными тенденциями преобразований мозгового черепа в онтогенезе, более выраженными в мужских черепах и протекающими с постоянным уменьшением скорости, являются приближение черепа к «полюсу золотой пропорции», а также «макроцефализация» и «матуризация», связанные с увеличением емкости и толщины костей. Эти изменения приводят к смене конфигурационной устойчивости, обусловленной малыми диаметрами при малой толщине костей, структурной устойчивостью, обусловленной большой толщиной костей при больших диаметрах.

Размеры мозгового черепа в онтогенезе меняются более значительно, чем его форма. Диаметры черепа мужчин завершают рост к первому периоду зрелого возраста, тогда как диаметры черепа женщин, менее значительно увеличиваясь в первые двадцать лет жизни, продолжают расти и в первом периоде зрелого возраста. Отмечаются также некоторое увеличение поперечного диаметра черепа мужчин и уменьшение продольного диаметра черепа женщин во втором периоде зрелого возраста.

Толщина кости на уровне глабелла-опистокранион не связана со средней толщиной кости. Увеличение толщины кости на этом уровне в черепе женщин происходит «за счет» размеров полости черепа, тогда как в черепе мужчин направлено «вовне», обуславливая в значительной степени величину продольного диаметра. Минимальная флуктуирующая асимметрия толщины внутренней компактной пластинки свидетельствует о том, что степень влияния стрессовых факторов на макроструктуру костей мозгового черепа человека уменьшается «снаружи внутрь».

Заключение

Конструкционная устойчивость мозгового черепа возникает в результате адаптации к экстремальному элиминирующему паноукнуменному фактору механической травмы, который, наряду с принципом минимизации массы и энергии, а также обеспечением оптимальной емкости, обуславливает изменчивость размеров, формы мозгового черепа и макроструктуры его костей между полюсами «макрокрании» и «микрочрании», «сферы» и «золотой пропорции», «грацильности» и «массивности».

Морфogeометрические параметры конструкционной устойчивости мозгового черепа включают его основные диаметры как показатели конфигурационной устойчивости, а также толщину костей и их слоев как показатели структурной устойчивости. Эти признаки, имея фундаментальную адаптивную ценность для существования человека в любой среде, относятся к видовым и представляют собой «надрасовые» морфологические черты.

Объективно существующим комплексом адаптивных морфogeометрических параметров, являющихся интегральными показателями размеров и формы мозгового черепа (диаметры), макроструктуры (толщина костей, компактных пластинок и диплоэ), определяющих и отражающих его конструкционную устойчивость и профиль индивидуального развития, является «краниотип». Наиболее контрастные маргинальные комплексы этих маркеров выделены при осуществлении «олиготипического» подхода в краниотипологии, адекватность которого подтверждена различиями вероятности возникновения перелома костей мозгового черепа в разных краниотипах.

Конфликт интересов

Работа выполнена в рамках направления НИР кафедры анатомии человека «Экспериментально-клиническое изучение закономерностей конструкции и биомеханических свойств органов и тканей систем организма в аспекте возрастнo-половой и индивидуальнo-типологической изменчивости» – регистрационный номер 01201373099.

Литература

1. Погорелов А.В. Геометрическая теория устойчивых оболочек. М.: Наука, 1966. 296 с.
2. Громов А.П. Биомеханика травмы: Повреждения головы, позвоночника и грудной клетки. М.: Медицина, 1979. 271 с.
3. Зайченко А.А., Анисимова Е.А., Алешкина О.Ю. Стереометрия трабекулярного и парахордального отделов мозгового черепа человека // Морфология. 1997. Т. 112, № 5. С. 81-83.
4. Алешкина О.Ю., Сперанский В.С., Музурова Л.В., Зайченко А.А. Изменчивость угла изгиба основания черепа и ориентации плоскости большого отверстия // Российские морфологические ведомости. М., 1999. № 1-2. С. 140.
5. Бунак В.В. Череп человека и стадии его формирования у ископаемых людей и современных рас // Труды Института этнографии АН СССР. Т.49. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1959. 284 с.
6. Ivanhoe F. Direct correlation of human skull vault thickness with geomagnetic intensity in some northern hemisphere populations // J. Hum. Evol. 1979. Vol. 8, № 4. P. 433-444.
7. Алексеев В.П., Дебеч Г.Ф. Краниометрия: Методика антропологических исследований. М.: Наука, 1964. 127 с.
8. Зайченко А.А., Анисимова Е.А. Основы конструкционной типологии мозгового черепа человека // Российские морфологические ведомости. 1998. № 3-4. С. 31-35.

9. Зайченко А.А. Конструкционная типология мозгового черепа человека // Морфология. 1997. Т. 111, № 2. С. 102-105.

Информация об авторе

А.А. Зайченко – ГБОУ ВПО Саратовский ГМУ им. В.И. Разумовского Минздрава России, кафедра анатомии человека, профессор, доктор медицинских наук (**A.A. Zaichenko** – *Saratov State Medical University n.a. V.I. Razumovsky, Department of Human Anatomy, Professor, Doctor of Medical Science*).