

УДК 004.94

Е.О. Шамраева, А.А. Шамраев

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

## ТРЕХМЕРНОЕ КРАНИОГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В работе рассмотрены вопросы антропологии, связанные с определением и классификацией формы черепа человека. Предложен метод построения трехмерных усредненных моделей черепа различных антропологических типов, используемых при моделировании черепных имплантатов.

**Ключевые слова:** усредненная модель черепа, антропологический тип черепа, антропометрические показатели, томограмма, метод распознавания, основанный на сопоставлении.

### Введение

В настоящее время в связи с повышением роста черепно-мозговых травм в результате ДТП достаточно серьезной проблемой является восстановление целостности черепа. Замещение утраченного фрагмента кости происходит с помощью черепных имплантатов, изготовленных на основании различных исходных данных с использованием разнообразных методов и средств. Авторами статьи был опубликован ряд работ, посвященных разработке методов построения компьютерных моделей черепных имплантатов по томографическим и рентгенографическим данным [1 – 5].

В качестве вспомогательного средства для устранения посттравматического дефекта черепа (ПТДЧ) в работе разработана усредненная модель черепа, получаемая по данным обследования пациентов. Для повышения точности построения имплантата усредненная модель черепа и череп пациента должны принадлежать к одному антропологическому типу.

### 1. Определение анатомических показателей черепа

Анатомическая форма любого органа определяется внешними очертаниями и конфигурацией. Форма черепа отражает закономерности его конфигурации на уровне входящих в его состав скелетных единиц и элементов костной структуры. Череп имеет достаточно сложный рельеф внутренней и наружной поверхностей, обусловленный расположением в его костных вместилищах головного мозга, органов чувств, нервных узлов и наличием многочисленных отверстий и каналов для прохождения сосудов и нервов.

Все кости черепа, за исключением нижней челюсти, неподвижно и прочно соединены друг с другом посредством зубчатых, плоских, чешуйчатых швов в области свода черепа и в области лица, а также постоянных и временных хрящевых соединений, в основании черепа.

Измерения параметров черепа проводятся с помощью специальных приборов и инструментов, которые позволяют определять линейные и угловые размеры, а также пространственные отношения в черепе. Для измерений череп устанавливают в определенном положении с помощью краниостата.

Большое значение имеет унификация измерений, которая достигается точным определением краниометрических точек. Общее число точек, используемых в антропологических исследованиях, превышает 80 [6]. Наиболее важные из них показаны на рис. 1:

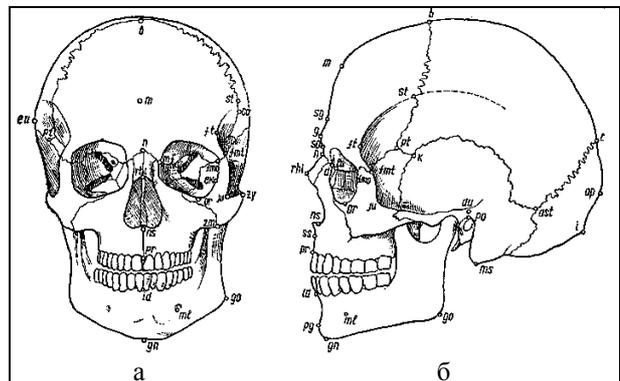


Рис.1. Схематическое отображение черепа с обозначением основных измерительных точек (по Мартину) [6]: а – во фронтальной плоскости; б – в сагиттальной плоскости

– ba – базион (*basion*) – самая нижняя точка, расположенная на переднем крае большого затылочного отверстия в медианной плоскости (средина переднего края большого затылочного отверстия);

– b – брегма (*bregma*) – точка в месте схождения стреловидного и венечного швов;

– g – глабелла (*glabella*) – наиболее выступающая вперед точка между надбровными дугами, при положении черепа во франкфуртской горизонтальной плоскости;

– i – инион (*inion*) – точка на месте схождения верхних полукружных линий в медианно-

сагиттальной плоскости. Определение этой точки затруднительно, поэтому рекомендуется брать инион в точке, которая лежит на месте перехода задней поверхности в нижнюю;

–  $l$  – ламбда (*lambda*) – точка соединения затылочной и обеих теменных костей, лежит на пересечении затылочного шва со стреловидным;

–  $m$  – метопион (*metopion*) – лежит на пересечении медиальной плоскости с линией, соединяющей наиболее выступающие точки лобных бугров;

–  $n$  – назион (*nasion*) – точка, лежащая в области носо-лобного шва медианной плоскости;

–  $op$  – опистокранион (*opistokranion*) – наиболее выступающая кзади и наиболее отстоящая от глабеллы точка на затылочной кости в медиальной плоскости;

–  $eu$  – эурион (*euryon*) – наиболее выступающая кнаружи (наиболее удаленная от медиальной плоскости) точка боковой стенки черепа, лежащая на теменной кости.

Для характеристики размеров и формы мозгового черепа наиболее часто пользуются абсолютными величинами трех основных диаметров – продольного, поперечного и высотного – и их соотношениями (указателями).

Продольный диаметр  $d_{long}$  – наибольшая длина черепа – измеряется от переносья (глабеллы) до наиболее удаленной точки затылка (опистокранион) в сагиттальной плоскости (рис. 1, б).

Групповые средние варьируют в пределах 167 – 193 мм.

Поперечный диаметр  $d_{trans}$  измеряется в месте наибольшей ширины черепа (эурион – эурион) во фронтальной плоскости.

Вариации групповых средних лежат в пределах 123 – 153 мм.

Высотный диаметр  $d_{high}$  измеряется на черепе как расстояние между точками базион – брегма. Групповые средние высотного диаметра варьируют от 126 до 143 мм. На живых людях высотный диаметр между точками базион – брегма не может быть определен, и высота измеряется от козелка уха до высшей точки головы (проекционное расстояние). Наиболее употребителен метод определения высоты черепной крышки по Швальбе: на сагиттальном снимке черепа измеряется перпендикуляр от линии глабела – инион к наиболее удаленной от этой линии точке черепного свода (на рис. 2 высота черепной крышки соответствует  $ch$ ), измеренная таким образом высота черепной крышки равна в среднем 87,4 мм.

Соотношения основных диаметров выражают с помощью указателей (индексов), вычисляя величину одного в процентах другого.



Рис. 2. Схема основных измерений черепного свода:  $i$  – инион,  $l$  – ламбда,  $b$  – брегма,  $m$  – метопион,  $g$  – глабела,  $ch$  – наибольшая высота свода

Наибольшее значение приобрел поперечно-продольный индекс  $i_{cl}$ :

$$i_{cl} = \frac{d_{trans} \cdot 100}{d_{long}}, \quad (1)$$

где  $d_{trans}$  – поперечный диаметр черепа;  $d_{long}$  – продольный диаметр черепа.

Существуют различные рубрикации величин этого указателя (табл. 1 [6]). Наиболее употребительна следующая: до 74,9 – долихокрания; от 75,0 до 79,9 – мезокрания; от 80,0 и выше – брахикрания. Границы между классами весьма условны.

Продольный и поперечный диаметры варьируют в значительной степени независимо друг от друга: большой продольный диаметр может сочетаться с большим и малым поперечным диаметром и наоборот.

Возрастная динамика продольного и поперечного диаметров несколько различна: продольный диаметр в процессе роста дает большее увеличение. Поэтому с возрастом головной указатель несколько понижается.

Для определения относительной высоты черепа используются два высотных указателя:

– высотно-продольный  $i_{hl}$ :

$$i_{hl} = \frac{d_{high} \cdot 100}{d_{long}}, \quad (2)$$

где  $d_{high}$  – высотный диаметр черепа;

– высотно-широтный  $i_{ht}$ :

$$i_{ht} = \frac{d_{high} \cdot 100}{d_{trans}}. \quad (3)$$

Принята следующая рубрикация (табл. 1 [6]):

– для высотно-продольного указателя: до 69,9 – хакекрания; от 70,0 до 74,9 – ортокрания; от 75,0 и выше – гипсикрания;

– для высотно-широтного указателя: до 91,9 – тапейнокрания; от 92,0 до 97,9 – метриокрания; от 98,0 и выше – акрокрания.

Между высотными указателями, с одной стороны, и черепным – с другой, имеется определенная зависимость. Увеличение продольного диаметра ведет к понижению как черепного, так и высотно-

продольного указателя, а его уменьшение – к повышению обоих указателей. Увеличение и уменьшение поперечного диаметра также сказывается и на черепном, и на высотно-широтном указателях.

## 2. Построение усредненной модели поверхности черепа

Прежде чем построить усредненную модель черепа, рассмотрим геометрические особенности черепа.

При обзоре черепа в целом его изучают с различных позиций.

При рассмотрении черепа:

– сверху – вертикальная норма (*norma verticalis*), виден свод, или крыша, черепа;

– снизу – базилярная норма (*norma basilaris*), – наружное основание черепа;

– спереди – фронтальная норма (*norma frontalis*), или лицевой отдел черепа;

– сзади – окципитальная норма (*norma occipitalis*), – затылочная часть мозгового отдела черепа;

– с боков – латеральная норма (*norma lateralis*), ряд углублений (ямки), ограниченных различными костями.

В современной краниологии широко применяется определение формы в вертикальной норме. По

очертанию контура выделяют несколько типов в зависимости от относительной длины черепа и положения его наибольшей поперечной оси (рис. 3).

Среди долихоидных черепов различают:

– эллипсоидный – наибольшая ширина приходится примерно на середину (рис. 3, а);

– пентагоидный – наибольшая ширина лежит в задней трети, сильно выступают лобные и теменные бугры, что придает черепу пятиугольный контур (рис. 3, б);

– овоидный – наибольшая ширина приходится также на заднюю треть, но лобные и теменные бугры сглажены (рис. 3, в).

На брахиоидных черепах соответственно различают типы:

– сфероидный, который соответствует эллипсоидному типу на долихоидных черепах и отличается от него относительно меньшей длиной и большей шириной (рис. 3, г);

– эурипентагоидный – широкий пентагоидный, отличающийся от пентагоидного также относительно большей шириной и меньшей длиной;

– сфеноидный – соответствует овоидному, но характеризуется дополнительно уплощением затылка (рис. 3, д).

Наряду с этими основными типами выделяют и другие варианты.

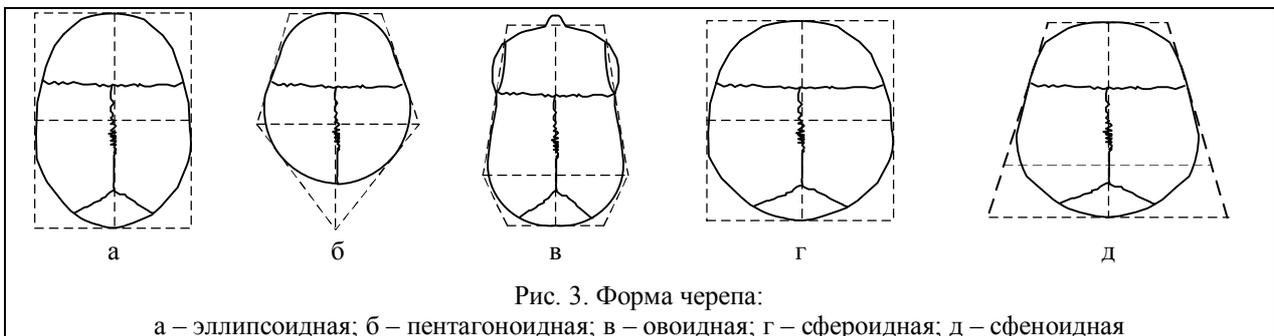


Рис. 3. Форма черепа:

а – эллипсоидная; б – пентагоидная; в – овоидная; г – сфероидная; д – сфеноидная

При построении модели имплантата в работах [2, 4] используется пять наиболее распространенных типов усредненных моделей черепа:

- эллипсоидная,
- овоидная,
- пентагоидная,
- сфероидная,
- сфеноидная,

характерных для европеоидной расы.

Исходными данными для получения усредненной модели черепа является набор из  $N$  изображений томографических срезов (с шагом 1 мм параллельно физиологической горизонтали – орбитомеатальной плоскости черепа при стандартной укладке пациента) черепа человека без каких-либо дефектов и резко выраженных индивидуальных особенностей и с анатомическими показателями,

относящимися к одному из пяти типов. Обработка КТ-данных происходит в соответствии с методом, предложенным в работах [2, 3].

В результате комплексной обработки, включающей в себя:

– предварительную обработку изображения с помощью нерекурсивного медианного фильтра с параметром апертуры  $(2p+1)$ , где  $p = 2$ ;

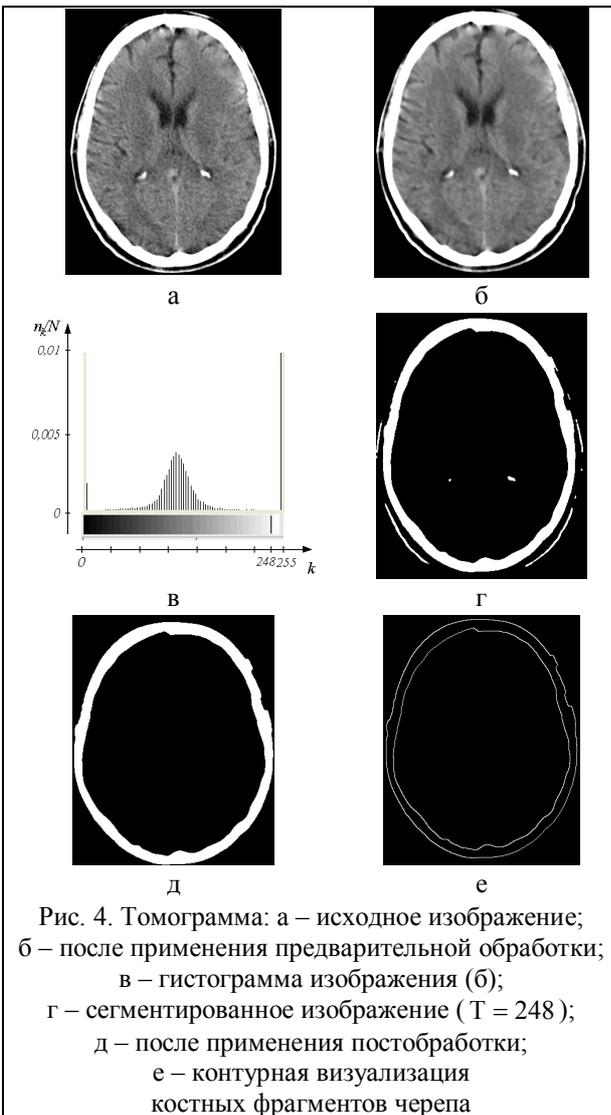
– формирование сегментированного изображения с помощью порогового фильтра. Глобальный порог бинаризации определяется путем построения и анализа гистограммы изображения;

– постобработку сегментированного изображения, основанную на применении морфологических операций размыкания и замыкания, формируется файл, содержащий координаты контурных точек костных фрагментов на всех КТ-

снимках. На основании данных этого файла строится объемная модель черепа методом триангуляции набора точек.

Исходное изображение томографического среза и томограмма, подвергнутая комплексной обработке, представлены на рис. 4.

На рис. 4, б – е показаны на примере одного КТ-снимка основные этапы обработки КТ-данных для подготовки данных для получения усредненной модели черепа.



Таким образом строятся Q моделей черепов, относящихся к одному из пяти типов и имеющих в своей основе одинаковое количество томографических срезов с одинаковым шагом.

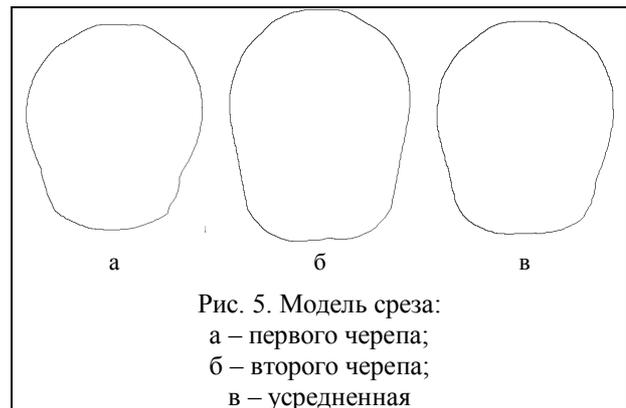
Усредненная модель черепа формируется путем вычисления усредненных координат контурных точек костных структур на основании Q сформированных ранее файлов моделей черепов.

Координаты точек усредненной модели черепа вычисляются согласно выражению (4) и сохраняются в файле.

$$x_{ij \text{ уср}} = \frac{\sum_{k=1}^Q x_{ijk}}{Q}, y_{ij \text{ уср}} = \frac{\sum_{k=1}^Q y_{ijk}}{Q}, z_{ij \text{ уср}} = \frac{\sum_{k=1}^Q z_{ijk}}{Q}, \quad (4)$$

где  $i=1, 2, 3, \dots, q$  – количество контурных точек костных структур на одном снимке;  $j=1, 2, 3, \dots, b$  – количество снимков;  $k=1, 2, 3, \dots, Q$  – количество моделей черепов, на основании которых строится усредненная модель.

Пример усредненной модели одного среза, построенного как среднее двух срезов (для наглядности взяты снимки, относящиеся к разным типам черепов) представлен на рис. 5.



При построении усредненной модели черепа используется полигональное представление. Пять усредненных моделей черепа, соответствующих основным типам черепа в вертикальной норме, представлены на рис. 6.

По проекциям каждой усредненной модели черепа автоматически определяются основные диаметры: продольный, поперечный и высотный.

На основании значений этих диаметров вычисляются по формулам (1) – (3) поперечно-продольный, высотно-продольный и высотно-широтный индексы. Основные параметры усредненных моделей черепа сохраняются в файле.

При построении 3D-модели черепа строятся его проекции (рис. 7), по которым находят крайние точки для расчета поперечного (рис. 7, а) (XZ-проекция) и продольного (рис. 7, б) (YZ-проекция) диаметров черепа путем сканирования изображений вдоль оси абсцисс.

Наиболее удаленная от линии глabella – инион точка свода черепа для расчета высотного диаметра (рис. 7, б) находится путем сканирования проекции YZ черепа вдоль линии, перпендикулярной прямой, соответствующей продольному диаметру черепа. Затем рассчитываются показатели черепа по формулам (1) – (3).

Принадлежность черепа пациента к тому или иному типу определяется с помощью метода распознавания, основанного на сопоставлении.

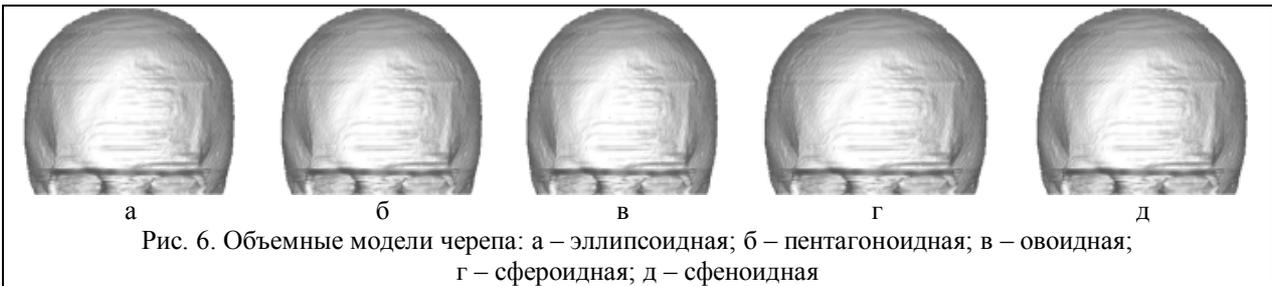


Рис. 6. Объемные модели черепа: а – эллипсоидная; б – пентагоноидная; в – овоидная; г – сфероидная; д – сфеноидная

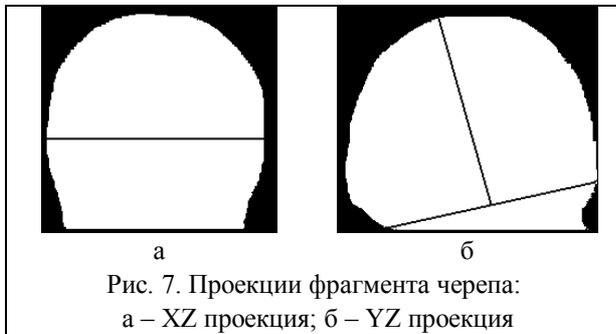


Рис. 7. Проекция фрагмента черепа: а – XZ проекция; б – YZ проекция

В методах распознавания, основанных на сопоставлении [7], каждый класс представляется вектором признаков образа, являющегося прототипом этого класса. Образ имеет форму:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где каждая из компонент  $x_i$  представляет  $i$ -й дескриптор (признак);  $n$  – общее число дескрипторов, связанных с данным образом.

Незнакомый образ приписывается к тому классу, прототип которого оказывается ближайшим в смысле заранее заданной метрики.

Простейший подход состоит в использовании классификатора, основанного на минимальном расстоянии, который вычисляет евклидовы расстояния между вектором признаков неизвестного объекта и каждым вектором прототипа.

Решение о принадлежности объекта к определенному классу принимается по наименьшему из таких расстояний.

Пусть прототип каждого класса определяется как вектор математического ожидания образов из этого класса:

$$\mathbf{m}_j = \frac{1}{N_j} \sum_{\mathbf{x} \in \omega_j} \mathbf{x}_j, \quad j=1, 2, \dots, w, \quad (6)$$

где  $N_j$  – число векторов признаков объектов класса  $\omega_j$ ;  $w$  – число классов, и суммирование ведется по всем таким векторам.

Один из способов отнести неизвестный объект к вектору признаков  $\mathbf{x}$  к какому-то классу состоит

в выборе того класса, прототип которого окажется ближайшим. При использовании евклидова расстояния в качестве меры близости задача сводится к вычислению расстояния

$$D_j(\mathbf{x}) = \|\mathbf{x} - \mathbf{m}_j\|, \quad j=1, 2, \dots, w, \quad (7)$$

где  $\|\mathbf{a}\| = (\mathbf{a}^T \mathbf{a})^{1/2}$  – евклидова норма.

После этого объект  $\mathbf{x}$  относится к тому классу  $\omega_i$ , для которого расстояние  $D_i(\mathbf{x})$  оказывается наименьшим.

Т.о., в данной постановке минимальное расстояние до прототипа означает наилучшее совпадение. Выбор кратчайшего расстояния эквивалентен вычислению функции

$$d_j(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{m}_j - \frac{1}{2} \mathbf{m}_j^T \mathbf{m}_j, \quad j=1, 2, \dots, w, \quad (8)$$

и отнесению затем  $\mathbf{x}$  к тому классу  $\omega_i$ , для которого  $d_i(\mathbf{x})$  принимает наибольшее численное значение.

Разделяющая поверхность между классами  $\omega_i$  и  $\omega_j$  задается множеством значений  $\mathbf{x}$ , для которых  $d_i(\mathbf{x}) = d_j(\mathbf{x})$ .

Общепринятая практика состоит в том, чтобы описывать разделяющую поверхность между двумя классами единой функцией

$$d_{ij}(\mathbf{x}) = d_i(\mathbf{x}) - d_j(\mathbf{x}) = 0.$$

Тогда  $d_{ij}(\mathbf{x}) > 0$  для образов из класса  $\omega_i$  и  $d_{ij}(\mathbf{x}) < 0$  для образов из класса  $\omega_j$ .

Из вышесказанного и уравнения (8) следует, что разделяющая поверхность между классами  $\omega_i$  и  $\omega_j$  в случае классификатора по минимуму расстояния задается уравнением

$$\begin{aligned} d_{ij}(\mathbf{x}) &= d_i(\mathbf{x}) - d_j(\mathbf{x}) = \\ &= \mathbf{x}^T (\mathbf{m}_i - \mathbf{m}_j) - \frac{1}{2} (\mathbf{m}_i - \mathbf{m}_j)^T (\mathbf{m}_i - \mathbf{m}_j) = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Заданная уравнением (9) поверхность представляет собой перпендикуляр, проведенный через середину отрезка, соединяющего точки  $\mathbf{m}_i$  и  $\mathbf{m}_j$  в пространстве признаков.

В случае  $n = 2$  это линия, при  $n = 3$  – плоскость, при  $n > 3$  – гиперплоскость.

Классификатор по минимуму расстояния хорошо работает в тех практических задачах, где расстояния между точками математических ожиданий классов велики по сравнению с диапазоном разброса объектов каждого класса.

В работе авторами используется пять классов ( $w = 5$ ); общее число признаков (дескрипторов)  $n = 3$ :

- значение поперечно-продольного индекса;
- значение высотно-продольного индекса;
- значение высотно-широтного индекса.

В связи с этим, пять классов, представляющих различные усредненные модели черепа, можно изобразить, как показано на рис. 8.

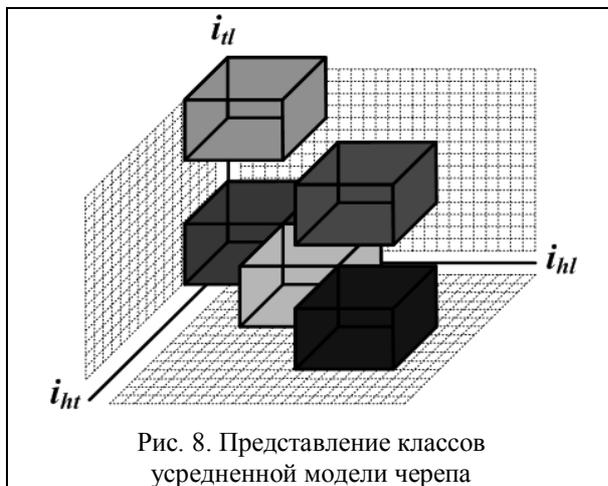


Рис. 8. Представление классов усредненной модели черепа

Усредненная модель черепа соответствующего антропологического типа используется для построения моделей черепных имплантатов по томографическим или рентгенографическим данным путем сопоставления компьютерной модели черепа пациента в первом случае [2, 3] или обработанных рентгеновских снимков во фронтальной или сагиттальной проекциях [1, 4] во втором с усредненной моделью черепа.

## Выводы

Авторами разработан метод построения трехмерных усредненных моделей черепа различных антропологических типов. Данные, полученные на этапе формирования трехмерных моделей черепов, используются для построения модели имплантата. Предложен метод автоматизированного определения основных анатомических параметров усредненной модели черепа. Использован метод классификации типа черепа пациента по анатомическим параметрам черепа.

## Список литературы

1. Бых А.И. Возможности реконструкции черепных дефектов по данным краниографии / А.И. Бых, О.Г. Аврунин, Е.О. Шамраева // *Техническая электродинамика*. – 2008. – №4. – С. 113-116.
2. Шамраева Е.О. Реконструкция объемных моделей черепа и имплантата по томографическим снимкам / Е.О. Шамраева, А.А. Шамраев, О.Г. Аврунин // *Системы обработки информации*. – X.: ХУПС, 2007. – Вып. 9(67). – С. 137-140.
3. Шамраева Е.О. Выбор метода сегментации костных структур на томографических изображениях / Е.О. Шамраева, О.Г. Аврунин // *Бионика интеллекта: информация, язык, интеллект*. – 2006. – №2 (65). – С. 83-87.
4. Шамраева Е.О. Построение моделей черепных имплантов по рентгенографическим данным / Е.О. Шамраева, О.Г. Аврунин // *Прикладная радиоэлектроника*. – 2005. – Т4, №4. – С. 441-443.
5. Шамраева Е.О. Сравнительный анализ методов построения черепных имплантатов в зависимости от типа исходных данных / Е.О. Шамраева // *Збірник наукових праць ХУПС*. – X.: ХУПС, 2008. – № 2(17). – С. 154-156.
6. Гинзбург В.В. Элементы антропологии для медиков / В.В. Гинзбург. – Л.: Медгиз, 1963. – 215 с.
7. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс; пер. с англ. П.А. Чочиа. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.

Поступила в редколлегию 7.04.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.Г. Удовенко, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

## ТРИВИМІРНЕ КРАНІОГРАФІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

О.О. Шамраєва, А.А. Шамраєв

У роботі розглянуто питання антропології, які пов'язано з визначенням і класифікацією форми черепа людини. Запропоновано метод побудови тривимірних усереднених моделей черепа різних антропологічних типів, що використовуються при моделюванні черепних імплантатів.

**Ключові слова:** усереднена модель черепа, антропологічний тип черепа, антропометричні показники, томограма, метод розпізнавання, заснований на зіставленні.

## THREE-DIMENSIONAL CRANIOGRAPHICAL MODELING

E.O. Shamraeva, A.A. Shamraev

The anthropology questions are considered here, which are related to the identification and classification of cranium forms. The three-dimensional averaged cranium models construction method for different anthropological types is proposed. It is used in modeling of cranial implants.

**Keywords:** averaged model of cranium, anthropological type of cranium, anthropometric indexes, tomogram, method of recognition, based on comparison.