

СОЗДАНИЕ 3D ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ ЧЕЛЮСТНОГО АППАРАТА РЫБ

¹Толмачева Ю.П., ²Пашков В.П., ³Пыхалов А.А.

¹*Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, e-mail: tjul78@mail.ru;*

²*Иркутский государственный технический университет, Иркутск;*

³*Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск*

В работе представлена методика создания геометрической твердотельной (3D) модели челюстного аппарата рыб, включающая ряд последовательных этапов: создание пакета векторных изображений (2D) сечений головы представленного объекта (*Procottus jeitelesii* (Dyb., 1878) на основе данных компьютерного томографа, создание общей каркасной конструкции висцерального скелета, с последующим ее преобразованием в геометрическую твердотельную (3D) модель челюстного аппарата. В дальнейшем полученная конструкция будет являться основой для создания конечно-элементных моделей и решения задач напряженно-деформированного состояния полученной конструкции, что позволит провести анализ взаимосвязи механических свойств и изменчивости структуры костной ткани, а также рассмотреть некоторые вопросы адаптивных преобразований челюстного аппарата позвоночных.

Ключевые слова: компьютерная томография, твердотельная 3D модель, рыбы, челюстной аппарат

CREATION 3D SOLID-STATE MODEL OF THE MAXILLARY DEVICE OF FISHES

¹Tolmacheva Y.P., ²Pashkov V.P., ³Pyhalov A.A.

¹*Limnological Institute, Irkutsk, e-mail: tjul78@mail.ru;*

²*Irkutsk State Technical University, Irkutsk;*

³*Irkutsk State University of Railway Transport, Irkutsk*

This paper presents a methodology to create the geometric solid (3D) model of the jaw apparatus of fishes, including the number of successive steps: the creation of a package of vector images (2D) sections of the head represented by an object (*Procottus jeitelesii* (Dyb., 1878) based on computed tomography, a common frame structure visceral skeleton, with its subsequent transformation into a geometric solid (3D) model of the jaw apparatus. in the future, the resulting design will be the basis for the finite-element modeling and solving stress – strain state of the resulting design, which will analyze the relationship of mechanical properties and structure variation bone, and to consider some of the issues of adaptive change jaw apparatus of vertebrates.

Keywords: computed tomography, 3D solid model, fish, jaw apparatus

Челюстная система, как основной элемент висцерального скелета, занимает одно из важных мест в организации позвоночных животных по сложности формирования и многообразию анатомического строения. В настоящее время, челюстной аппарат позвоночных рассматривается многими исследователями как специализированная многоблочная биомеханическая система, сформировавшаяся в процессе многоэтапных эволюционных преобразований в результате приспособления вида к условиям обитания [5, 7, 9]. С этой точки зрения, решение вопросов адаптивных преобразований челюстной системы, требует описания механических свойств костной ткани, поскольку преобразования формы и внутренней структуры кости является следствием ее напряженно-деформированного состояния, возникающего при изменении внешней механической нагрузки. Одним из методических подходов, позволяющих приблизиться к решению этой проблемы, является использование методов инженерного анализа, в частности, создание конечно-элементных моделей на основе компьютерной томографии, что дает возможность выяв-

лять локализацию напряжения и деформации в исследуемом объекте при заданных нагрузках и физических характеристиках [1, 2, 4, 6, 8].

Планируемая работа направлена на разработку 3D конечно-элементной модели висцерального скелета рыб и анализ изменчивости его костных структур, отражающих адаптивные преобразования челюстного аппарата у видов с различной пищевой стратегией [3]. Основной проблемой в создании математической модели скелета рыб является сравнительно низкая плотность костной ткани представителей этой группы позвоночных, что значительно затрудняет визуализацию и анализ изображений, полученных на основе компьютерной томографии. Поэтому, одной из первостепенных задач настоящей работы являлось создание геометрической твердотельной (3D) модели челюстного аппарата рыб, являющейся основой для дальнейшего конечно-элементного анализа.

Методика создания 3D твердотельной геометрической модели челюстного аппарата рыб

1. Создание пакета изображений сечений головы. Биологическим прототипом,

настоящей модели, являлся экземпляр представителя бентических байкальских коттоидных рыб – *Procottus jeitelesii* (Dyb., 1878). Для получения изображений сечений головы рыбы использовался аппарат конусно-лучевой объёмной томографии Gendex GXCB-500, применяемый на базе Ангарского стоматологического центра (<http://www.east-siberia.ru>). Общий размер матрицы кадра изображения составлял 216×216 мм, энергетические характери-

стики сеанса – kV = 120 и mA = 5. Время полной экспозиции заданного объекта не превышало 6 секунд. Шаг сечений был выбран минимальным и равным стороне вокселя, размеры сторон которого по осям координат составляли 0,4 мм. Всего было получено 106 изображений сечений головы. В качестве исходного формата растровых изображений использовался формат jpeg с размером рисунка 312×312 пикселей (рис. 1 а).

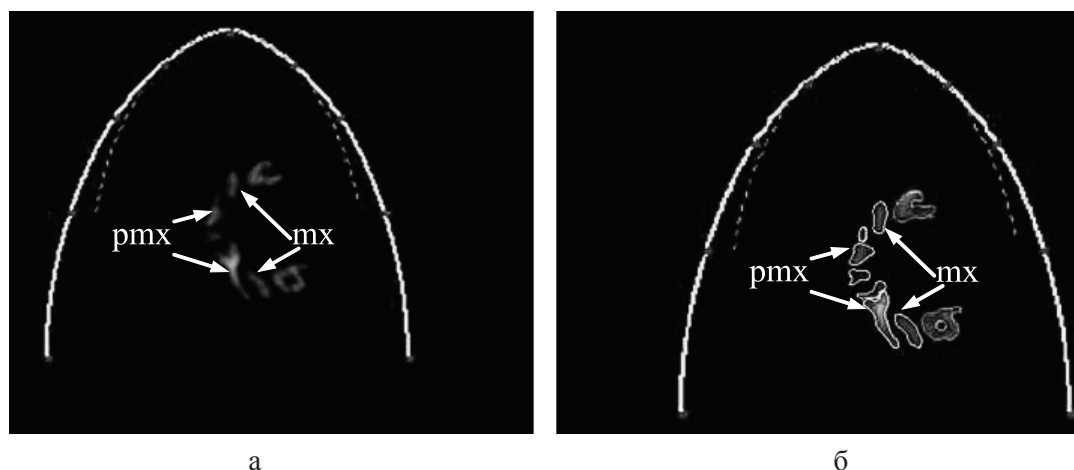


Рис. 1. Создание контура сечения костей челюстного аппарата (2D модель) *Procottus jeitelesii* на основе растрового изображения сечений головы:
 а – растровое изображение среза головы рыбы;
 б – контуры сечений костей челюстного аппарата рыбы.
 Обозначения: pmx – praemaxillare, предчелюстная кость; mx – maxillare, челюстная кость

2. Анализ растрового изображения головы и создание контура сечений костей челюстного аппарата (2D модель). При анализе растровых изображений с помощью кроссплатформенной программы просмотра изображений XnView 1.98-2 (<http://www.xnview.com>) применена RGB цветовая модель. Для анализа кадра сечения были заданы параметры яркости и контрастности: W = 2149, L = 960. При чёрно-белом изображении RGB цветовая модель позволяет формировать любое изображение 255 оттенками серого цвета. Сечения костей исследуемого объекта имели индексы цвета в диапазоне 2–112.

Контур сечения кости был создан путём векторизации геометрического места точек при переходе от индекса цвета 0 (соответствующего черному цвету фона) к индексам цвета 2 и более на границе сечения кости (рис. 1 б). Для совместимости полученных данных с программами инженерного анализа контур сечения был переведен в формат dxf.

3. Создание каркасной модели и формирование симметричной твердотельной модели (3D) костей челюстного аппарата.

Каркасная модель висцерального скелета объекта была создана с помощью системы Femap V 10 (<http://www.femcomp.com>) в глобальной прямоугольной системе координат путём последовательной установки полученных контуров сечений костей в пространстве, с шагом равным высоте вокселя (рис. 2 а). При использовании общей конструкции висцерального скелета были выделены каркасные блоки, соответствующие костям челюстного аппарата.

Для создания твердотельной модели костей челюстного аппарата рыбы выделенные блоки (челюстные кости) каркасной модели покрывались геометрическими поверхностями максимально приближающих каркас к форме заданного биологического объекта (кости) (рис. 2 б). Достоверность геометрических данных, полученной модели достигалась посредством использования остеологических препаратов и морфометрических данных челюстных костей исследуемого объекта. В итоге, была сформирована симметричная твердотельная модель челюстного аппарата рыбы.

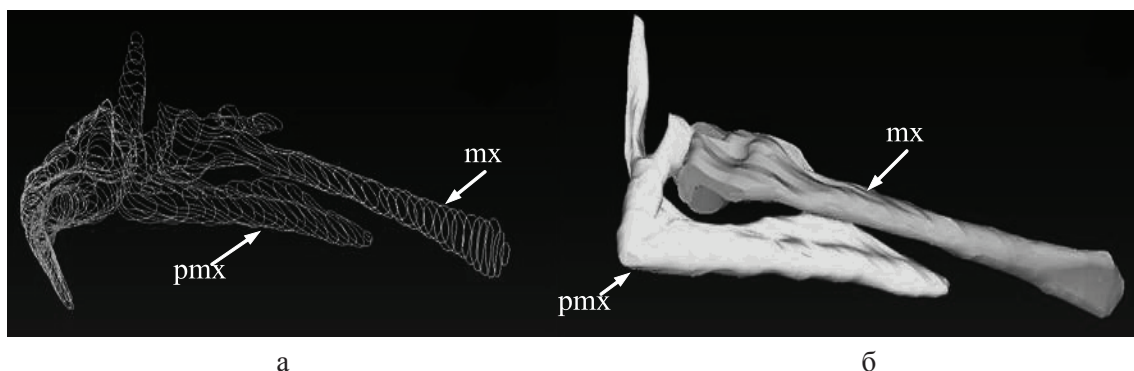


Рис. 2. Создание твердотельной 3D модели верхней челюсти на основе каркаса висцерального скелета *Procottus jeitelesii*:

а – каркасная модель; б – твердотельная 3D модель.

Обозначения: pmx – praemaxillare, предчелюстная кость; mx – maxillare, челюстная кость

Заключение

В дальнейшем полученная твердотельная 3D модель биологического объекта будет являться основой для создания конечно-элементных моделей, расчёта нагрузок и инженерного анализа напряжённо-деформированного состояния полученной конструкции, что позволяет провести анализ взаимосвязи механических свойств и изменчивости внешней и внутренней структуры костной ткани, а также решения вопросов адаптивных преобразований челюстного аппарата рыб, в целом.

Авторы искренне благодарны за помощь в выполнении настоящей работы ведущим сотрудникам Ангарского стоматологического центра Кривда Г.С. и Белозерову Н.Д. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-3457.2011.4 «Исследование биомеханических основ преобразования челюстного аппарата рыб на основе применения 3D конечно-элементной модели».

Список литературы

1. Пашков В.П. Применение метода конечных элементов и контактной задачи теории упругости при создании математической модели костной ткани человека / В.П. Пашков А.А. Пыхалов, М.С. Кувин // Проблемы Земной цивилиза-

ции: межвуз. сборник научных трудов. – Иркутск: ИрГТУ, 2008. – С. 35–47.

2. Применение метода конечных элементов и контактной задачи твердого деформируемого тела в моделировании фиксации кости при переломах / М.С. Кувин [и др.] // Бюл. ВСНЦ СО РАМН. – 2010. – Т. 73. – С. 226–231

3. Толмачева Ю.П. Геометрическая конструкция в исследовании строения челюстного аппарата рыб // Современные зоологические исследования в России и сопредельных странах: мат-лы I Междунар. научно-практической конф., Чебоксары 26 марта 2011 г. – Чебоксары: типография «Новое время», 2011. – С. 138–142.

4. Curtis, N. Finite element modelling of the cat skull / N. Curtis, K. Kupczik, M.J. Fagan // Journal of Morphology. – 2007. – Vol. 268, № 3. – P. 1053.

5. Daegling D.J. Experimental observation, theoretical models, and biomechanical inference in the study of mandibular form / D.J. Daegling, W.L. Hylander // Am. J. Phys. Anthropol. – 2000. – Vol. 112, № 5. – P. 541–551.

6. Kupczik, K. Virtual biomechanics: basic concepts and technical aspects of finite element analysis in vertebrate morphology // Journal of Anthropological Sciences. – 2008. – Vol. 86, №4. – P. 193–198.

7. Martin R.B. Skeletal tissue mechanics / R.B. Martin, D.B. Burr, N.A. Sharkey // Second edition. – New York: Springer-Verlag, 1998. – 392 p.

8. Finite element analysis in functional morphology / B.G. Richmond [et al.] // Anat. Rec. – 2005. Vol. 283, № 2. – P. 259–274.

8. Symanovskaya E.Y. Mechanical pressure as generator of growth, development and formation of the dentofacial system / E.Y. Symanovskaya, M.Ph. Bolotova, Y.I. Nyashin // Russian Journal of Biomechanics. – 2001. – Vol. 3. – P. 3–11.