

УДК 597.585.4.591.431

## **3D-моделирование и анимация висцерального скелета рыб: тестирование системы четырехзвенных механизмов**

**Толмачева Ю.П.<sup>1,2\*</sup>, Долид Е.А.<sup>1\*\*</sup>, Петухов С.Ю.<sup>1\*</sup>,  
Пашков В.П.<sup>3\*\*\*</sup>, Пыхалов А.А.<sup>4\*\*\*\*</sup>**

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Лимнологический институт СО РАН, Россия, Иркутск, 664033, ул. Улан-Баторская, д.3.

<sup>2</sup>Инженерно-технологический институт Сибирской академии Права, Экономики и Управления, Россия, Иркутск, 664025, ул. Сурикова, д.21.

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, Россия, Иркутск, 664074, ул. Лермонтова, д.81.

<sup>4</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, Россия, Иркутск, 664074, ул. Чернышевского, д.15.

**Аннотация.** В результате применения ряда компьютерных технологий на основе пошагового анализа данных компьютерного томографа была создана 3D сборная костно-мышечная конструкция висцерального отдела черепа рыб. Разработанный трехмерный объект был совмещен с модифицированной кинематической системой четырехзвенных механизмов, что позволило осуществить имитацию и тестирование возможных вариантов движения челюстных костей.

**Ключевые слова:** 3D-моделирование, функциональная морфология, анимация, четырехзвенный механизм, висцеральный скелет, челюстной аппарат, рыбы.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время, челюстной аппарат рассматривается как специализированная биомеханическая система, сформировавшаяся в процессе многоэтапных преобразований в результате приспособления вида к условиям обитания [1–3].

Появление и развитие в медицине новых неинвазивных методов диагностики на основе компьютерной томографии способствовало созданию близких по геометрическим параметрам к биологическому прототипу 3D-моделей костей человека, некоторых млекопитающих и ископаемых пресмыкающихся [4–11]. Моделирование скелета низших позвоночных до настоящего времени было затруднено в связи с низкой плотностью их костной ткани. Основываясь на опыте зарубежных и отечественных исследователей, нами была разработана пошаговая методика 3D-моделирования отдельных костей рыб [12], которая на данный момент не имеет аналогов и является основой для создания сборной конструкции черепа этой группы животных для исследования его строения и функций.

---

\*[tjul78@mail.ru](mailto:tjul78@mail.ru)

\*\*[djohn2517@yandex.ru](mailto:djohn2517@yandex.ru)

\*\*\*[vil\\_p@mail.ru](mailto:vil_p@mail.ru)

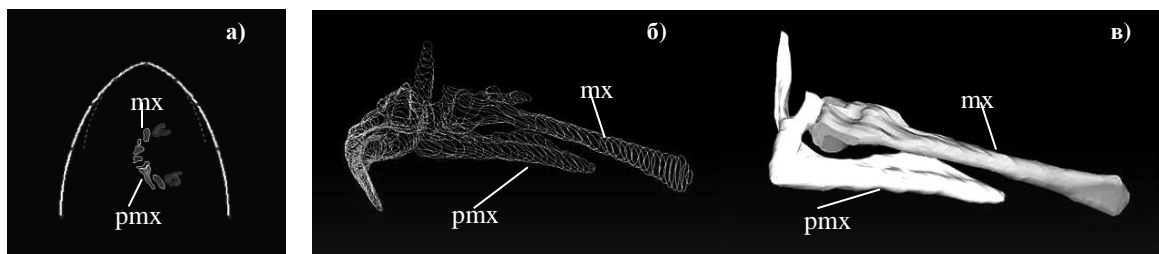
\*\*\*\*[pikhalov\\_aa@irgups.ru](mailto:pikhalov_aa@irgups.ru)

Одним из подходов, применяемых в решении вопросов функциональной морфологии, является использование четырехзвенных механизмов, традиционных для разработок в отрасли машиностроения. Совмещение этих конструктивных данных с моделью биологического объекта позволяет описать возможные варианты движения и взаимодействия различных элементов опорно-двигательного аппарата позвоночных [13–21]. Однако до сих пор работы в этой области были основаны на плоскостных моделях. Целью настоящей работы являлось создание 3D костно-мышечной конструкции висцерального скелета рыб и ее анимация с помощью системы четырехзвенных механизмов.

## МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ И АНИМАЦИИ 3D ВИСЦЕРАЛЬНОГО СКЕЛЕТА РЫБ

### 1. Создание 3D-модели висцерального скелета рыб

Биологическим прототипом настоящей модели являлся экземпляр представителя 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>). Шаг сечений составлял 0,4 мм. Всего было получено 106 изображений сечений головы, в качестве исходного формата растровых изображений использовался формат jpeg (312×312 пикселей) (рис. 1). При анализе изображений с помощью кроссплатформенной программы просмотра изображений XnView (<http://www.xnview.com>) была применена RGB цветовая модель. Контур сечения кости был создан путём векторизации точек при переходе от индекса цвета 0 (соответствующего черному цвету фона) к индексам цвета 2 и более на границе сечения кости (рис. 1,а).

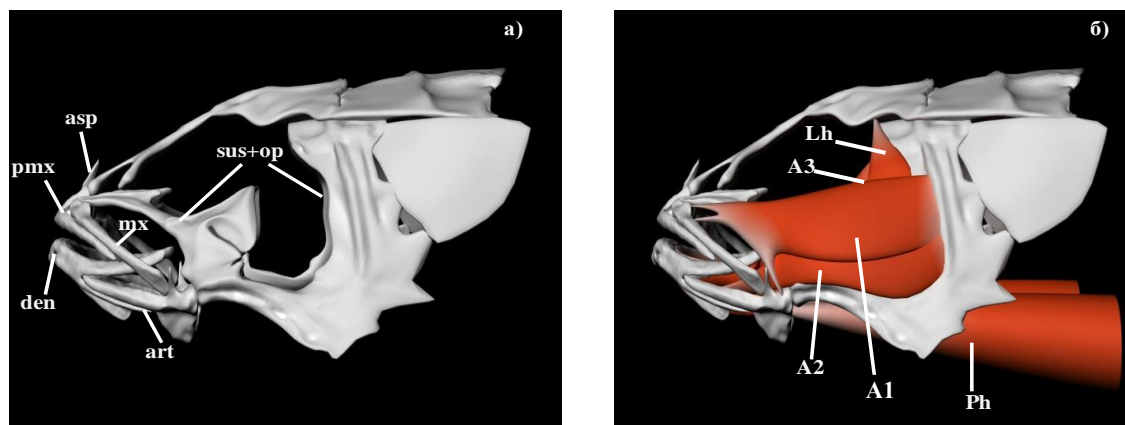


**Рис. 1.** Последовательность создания 3D твердотельной модели висцерального скелета рыб (*Procottus jeitelesii*), на примере верхнечелюстных костей: а) контуры сечения челюстных костей на снимке компьютерного томографа; б) каркасная модель костей верхней челюсти; в) твердотельная модель верхней челюсти. Обозначения основных элементов: mx – верхнечелюстная кость, pmx – предчелюстная кость.

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. 1,б). Для создания симметричной твердотельной модели выделенные блоки («моноклит suspensorium + operculare», maxillare, praemaxillare, dentale, anguloarticulare) покрывались геометрическими поверхностями, максимально приближающими каркас к форме заданного биологического объекта (рис. 1,в и 2,а).

Достоверность геометрических данных полученной модели достигалась посредством использования остеологических препаратов и морфометрических данных челюстных костей исследуемого объекта. Необходимые элементы мускулатуры были

реконструированы на основе визуализации фиксированных препаратов головы рыб и литературных данных с использованием программы трехмерного моделирования и анимации Autodesk Maya 2012 (<http://www.autodesk.com>). Таким образом, была получена трехмерная сборная конструкция висцерального скелета рыб (рис. 2,б).

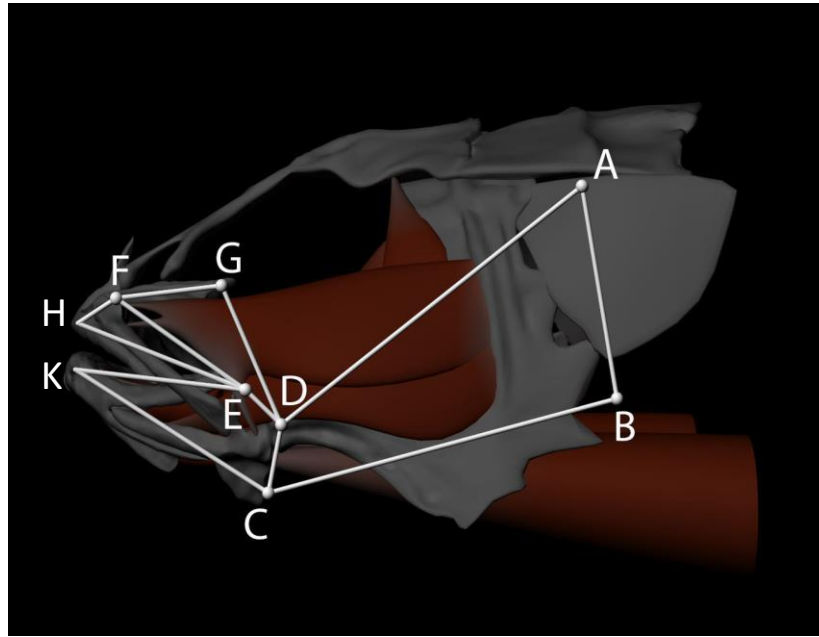


**Рис. 2.** а) 3D-конструкция висцерального скелета рыб; б) Сборная 3D костно-мышечная конструкция висцерального отдела черепа рыб. Обозначения основных элементов конструкции: Кости: art – сочленовая кость, den – зубная кость mx – верхнечелюстная кость, op+sus – комплекс костей подвеска и жаберной крышки, pmx – предчелюстная кость (asp – восходящий отросток pmx). Мускулатура: A1, A2, A3 – порции m. adductor mandibulare, Lh – m. levator hyomandibulare et arcus palatini, Ph – m. protractor hyoidei.

## 2. Модификация системы четырехзвенных конструкций для модели висцерального скелета

Комплексное взаимодействие между костными элементами висцерального скелета рыб имитировалось в программе трехмерного моделирования и анимации Autodesk Maya 2012 с помощью метода четырехзвенных механизмов, применяемого в машиностроении. Посредством объектов программы были созданы звенья конструкций (объект joint) и манипуляторы управления узлами (объект ik Handle). Для описания возможных вариантов движения костных элементов челюстного аппарата использованы челюстной (DEFG) и оперкулярный (ABCD) четырехзвенные механизмы, протестированные ранее на плоскостных моделях (2D) других видов рыб [19–21] (рис. 3).

Оба механизма представляют собой простые замкнутым конструкции, состоящие из четырех шарнирно сочлененных элементов, при этом звенья – основания (AD – оперкулярный механизм и DG – челюстной механизм) – являются неподвижными. Ведущее звено (AB – оперкулярный механизм и ED – челюстной механизм), к которому приложено внешнее силовое воздействие, при перемещении полностью задает траекторию движения остальных подвижных элементов механизма. В качестве дополнительных звеньев для челюстной конструкции (DEFG) использовались линейные параметры костей нижней челюсти (KE и KC) и praemaxillare (EH и FH). В настоящей модели, в отличие от предложенных ранее, все конструкции были функционально объединены (объект parent Constraint), и имитируемые движения челюстного аппарата инициировались с одного из ведущих звеньев. Локализация узлов приложения нагрузок соответствовала расположению основных элементов связочно-мышечного аппарата, участвующих в работе челюстной системы. Направления прилагаемых к моделям внешних сил были заданы согласно полученным ранее результатам тестирования кинематических моделей челюстного аппарата рыб [19, 21, 22].



**Рис. 3.** Система челюстно-оперкулярных четырехзвенных механизмов висцерального скелета рыб. Обозначения: 1) Оперкулярный механизм ABCD (AB – входящее звено, BC – связывающее звено, CD – выходящее звено, AD – основание); 2) Челюстной механизм DEFG (DE – входящее звено, EF – связывающее звено, FG – выходящее звено, GD – основание) дополнительные звенья (СК и KE – нижняя челюсть, EH и FH – предчелюстная кость).

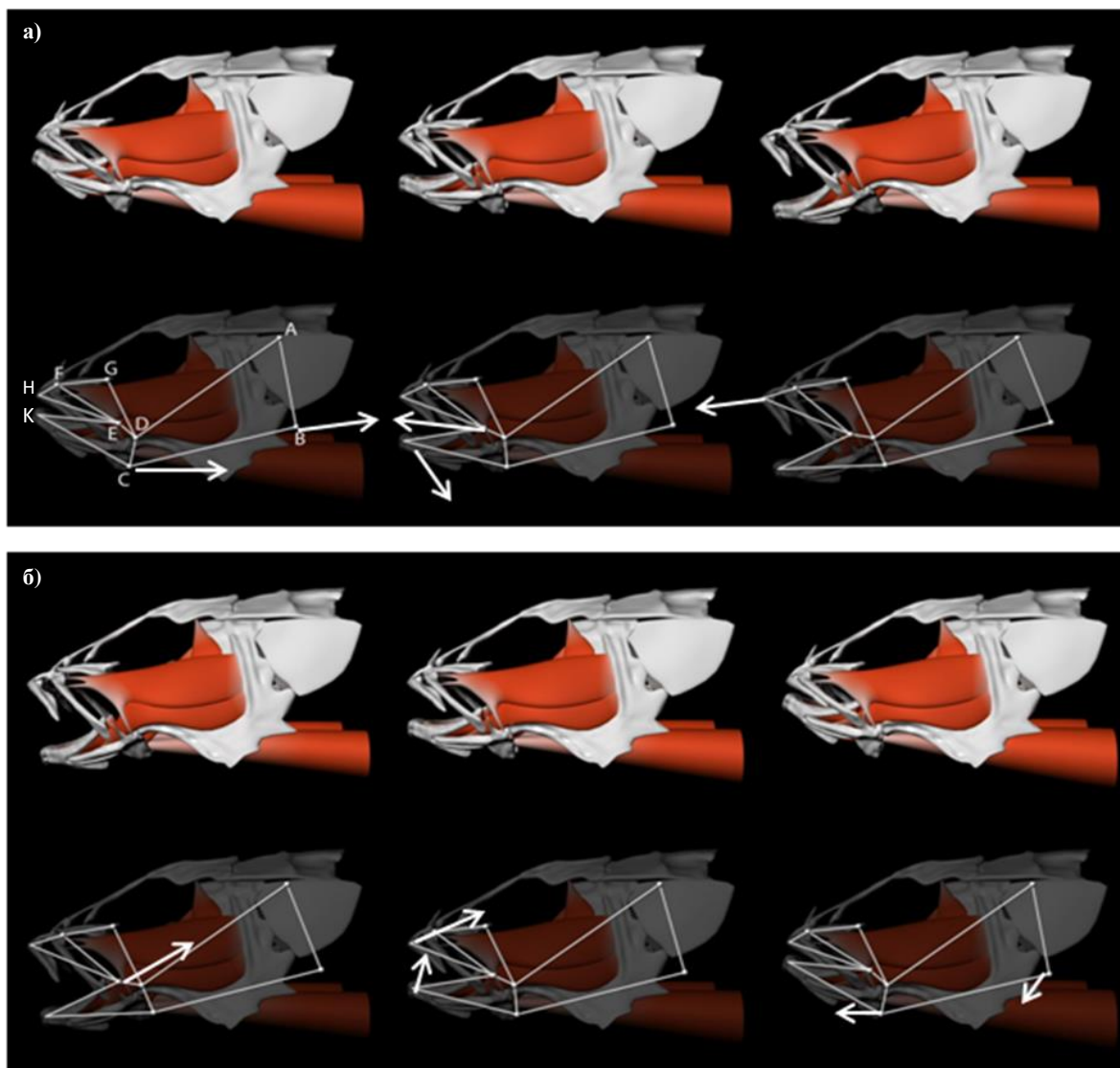
### АНИМАЦИЯ И ТЕСТИРОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ДВИЖЕНИЯ КОСТЕЙ ВИСЦЕРАЛЬНОГО СКЕЛЕТА РЫБ

В результате приложения сил к ведущим звеньям системы конструкций была осуществлена имитация движения челюстных костей модели (рис. 4). Анализ фиксированных изображений, полученных при анимации модели, позволяет сделать описание двух вариантов сценария: открытие рта (подготовка к захвату добычи) и закрытие рта (захват добычи).

*Вариант «Открытие рта».* Процесс открытия рта (рис. 4,а) у модели инициируется посредством ведущего звена АВ оперкулярного механизма, которое осуществляет перемещение жаберной крышки вверх. Оперкулярный механизм передает движение челюстному механизму через общий узел С (контакт звеньев ВС и СК) и имитирует воздействие *m. protractor hyoidei* на передний конец *dentale* (звено СК) в направлении назад и вниз. Нижняя челюсть, образованная дополнительными звеньями СК и KE, опускаясь, перемещает узел Е (ведущее звено ED) вперед и вниз, ведущее звено тянет в этом же направлении соединенные с ней (через *l. maxilla-mandibulare anterior*) вентральные концы *praemaxillare* (дополнительное звено EH) и *maxillare* (связывающее звено EF). Одновременно с помощью порции *m. adductor mandibulae A1* производится воздействие на верхний отдел *maxillare* (связующее звено EF), в результате которого она выталкивает вперед восходящий отросток *praemaxillare* (промежуточное звено FH), подвижно сочлененный с этмоидальным отделом невробрания.

*Вариант «Закрытие рта».* Закрытие рта (рис. 4,б) осуществляется посредством ведущего звена ED челюстного механизма, имитирующего движение верхнего отростка *anguloarticulare* и корonoидного отростка *dentale* под действием комплекса *m. adductor mandibulae (A1, A2, A3 и Aw)*. Звено ED, перемещаясь назад и вверх, одновременно передает аналогичное движение звеньям нижней (СК и KE) и верхней (EH и EF) челюстей и возвращает их в исходную позицию. Нижняя челюсть, поднимаясь,

действует через общий узел С на оперкулярную конструкцию (ABCD) и опускает ее вниз.



**Рис. 4.** Имитация движений костей челюстного аппарата с использованием системы челюстно-оперкулярных четырехзвенных механизмов: а) вариант «Открытие рта» б) вариант «Закрытие рта». Стрелки – направление имитируемых движений.

Таким образом, была протестирована модифицированная система челюстно-оперкулярных четырехзвенных механизмов в среде трехмерных объектов, с помощью которой произведена имитация возможных вариантов движения челюстных костей рыб. В целом последовательность движений основных скелетных элементов у анимированной модели соответствует универсальной схеме функционирования челюстного аппарата рыб с выдвигаемым ртом [19, 21, 22].

Разработка представленного выше подхода позволяет объединить традиционные методы исследований, используемые в биологии, и методы инженерного анализа, построенные на основе создания трехмерных моделей. Дальнейшее планирование работ в этом направлении связано с разработкой ряда подобных конструкций для других видов рыб, что позволит осуществить количественный расчет и возможных движений, и взаимодействия костных элементов висцерального скелета с учетом их видоспецифичной геометрии.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы искренне благодарны за помощь в выполнении настоящей работы сотрудникам Ангарского стоматологического центра Кривда Г.С. и Белозерову Н.Д. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ мол\_а № 12-04-32222 «Функциональный анализ строения и адаптивных преобразований челюстного аппарата рыб на основе 3D анимационной модели».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Martin R.B., Burr N.A. *Sharkey Skeletal tissue mechanics*. New York: Springer-Verlag, 1998. 392 p.
2. Cowin S.C. Wolff's law of trabecular architecture at remodeling equilibrium. *J. Biomech. Eng.* 1986. V. 108. № 1. P. 83–88.
3. Symanovskaya E.Y., Bolotova M.Ph., Nyashin Y.I. Mechanical pressure as generator of growth, development and formation of the dentofacial system. *Russian Journal of Biomechanics*. 2001. V. 3. P. 3–11.
4. Fagan M.J, Julian S., Siddall D.J., Mohsen A. Patient-specific spine models – Part 1: finite element analysis of the lumbar intervertebral disc – a material sensitivity study. *Proc. IME H J. Eng. Med.* 2002. V. 216. P. 299–314.
5. Richmond B.G., Wright W., Grosse I., Dechow P.C., Ross C., Spencer M., Strait D. Finite element analysis in functional morphology. *Anat. Rec.* 2005. V. 283. P. 259–274.
6. Curtis N.K., Kupczik M.J., Fagan D. Finite element modelling of the cat skull. *Journal of Morphology*. 2007. V. 268. P. 1053.
7. Kupczik K. Virtual biomechanics: basic concepts and technical aspects of finite element analysis in vertebrate morphology. *Journal of Anthropological Sciences*. 2008. V. 86. P. 193–198.
8. Kupczik K. Finite element analysis of craniofacial morphology in primates. *Bulletin der Schweizerischen Gesellschaft für Anthropologie*. 2009. V. 14. P. 40–48.
9. Werneburg I., Hertwig St. Head Morphology of the Ricefish, *Oryzias latipes* (Teleostei: Beloniformes). *Journal of morphology*. 2009. V. 270. P. 1095–1106.
10. O'Higgins P., Fitton L., Phillips R., Shi J.F., Liu J., Groening F., Cobb S.N., Fagan M.J. Virtual functional morphology: novel approaches to the study of craniofacial form and function. *Evolutionary Biology*. 2009. DOI 10.1007/s11692-012-9173-8.
11. Пашков В.П., Зотов И.Н., Пыхалов А.А. Пре-процессорный и инженерный анализ объектов со свойствами анизотропии материалов. *Вестник ИрГТУ*. 2011. Т. 48. № 1. С. 34–39.
12. Tolmacheva Yu.P., Pachkov V.P., Pyhalov A.A. Creation 3d Solid-State Model of The Maxillary Device of Fishes. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2012. V. 8. P. 14–16.
13. Osse J.W. Functional morphology of the head of the perch (*Perca fluviatilis*): An electromyographic study. *Neth. J. Zool.* 1969. V. 10. P. 289–392.
14. Anker G.Ch. Morphology and kinetics of the stickleback, *Gasterosteus aculeatus*. *Trans. Zool. Soc. (London)*. 1974. V. 32. P. 311–416.
15. Lauder G.V. Evolution of the feeding mechanism in primitive actinopterygian fishes: A functional anatomical analysis of Polypterus, *Lepisosteus*, and *Amia*. *J. Morph.* 1980. V. 163. P. 283–317.
16. Lauder G.V. Intraspecific functional repertoires in the feeding mechanism of the characoid fishes *Lebiasina*, *Hoplias* and *Chalceus*. *Copeia*. 1981. P. 154–168.
17. Liem K.F. Modulatory multiplicity in the functional repertoire of the feeding mechanism in cichlids. *J. Morph.* 1978. V. 158. P. 323–360.
18. Liem K.F. Adaptive significance of intra- and interspecific differences in the feeding repertoires of cichlid fishes. *Amer. Zool.* 1980. V. 20. P. 295–314.

19. Westneat M.W. Feeding mechanics of teleost fishes (Labridae: Perciformes): A test of four-bar linkage models. *J. Morph.* 1990. V. 205. P. 269–295.
20. Westneat M.W. A biomechanical model for analysis of muscle force, power output and lower jaw motion in fishes. *J. Theoretical Biology.* 2003. V. 223. P. 269–281.
21. Westneat M.W. Evolution of levers and linkages in the feeding mechanisms of fishes. *Integrative and Comparative Biology.* 2004. V. 44. P. 378–389.
22. Dobben W.N. Uber der Kiefermechanismus der Knochenfische. *Archiv neerland. Zoolog.* 1935. V. 50. P. 1–72.

Материал поступил в редакцию 11.10.2013, опубликован 31.10.2013.