

## ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КАТЕГОРНОЙ МОДЕЛИ КАК АНАТОМО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЕННОГО СУСТАВА ЧЕЛОВЕКА

Муха Ю.П.<sup>1</sup>, Колмаков А.А.<sup>1</sup>, Безбородов С.А.<sup>1</sup>, Баринов А.С.<sup>2</sup>, Чеканин И.М.<sup>1</sup>, Алборов А.Ц.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГБОУ ВПО «Волгоградский государственный медицинский университет» Минздрава России, Волгоград, e-mail: kolmakov\_alex241@mail.ru;

<sup>2</sup>ГБУ «Волгоградский медицинский научный центр», Волгоград

---

С помощью описания фазового пространства наблюдения коленного сустава и выбором информационных параметров для осуществления системного подхода в рамках измерительного процесса, синтеза структурной модели силовых взаимодействий между элементами коленного сустава, а также распределения аналитических формализмов описания силовых контактов элементов коленного сустава разработана категорная модель коленного сустава человека. Представленная модель коленного сустава человека позволяет объективизировать состояние анатомо-функциональных элементов сустава. Это дает возможность наиболее четко выявлять наличие или отсутствие патологических состояний коленного сустава, осуществлять выбор рациональных методов лечения, реабилитации и профилактики. Предложенная формализация поведения коленного сустава является корректной, обобщенной, благодаря категорному описанию, и в то же время допускает требуемую конкретизацию, определяемую индивидуализацией самого объекта.

---

Ключевые слова: коленный сустав, категорная модель, распределение нагрузки, биомеханические характеристики.

## POSSIBLE APPLICATIONS OF CATEGORICAL MODEL AS ANATOMICAL AND FUNCTIONAL CHARACTERISTICS OF THE HUMAN KNEE JOINT

Mukha Y.P.<sup>1</sup>, Kolmakov A.A.<sup>1</sup>, Bezborodov S.A.<sup>1</sup>, Barinov A.S.<sup>2</sup>, Chekanin I.M.<sup>1</sup>, Alborov A.C.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Volgograd State Medical University, Volgograd, e-mail: kolmakov\_alex241@mail.ru;

<sup>2</sup>Volgograd Medical Research Center, Volgograd

---

By describing the phase space of observation of the knee joint and the choice of information options for the implementation of a systematic approach within the framework of the measurement process, the synthesis of structural models of force interactions between elements of the knee joint, as well as distribution of analytical formalisms describe the strength of the contacts of the knee joint developed categorical model of the knee joint of man. Presents a model of human knee joint allows you to objectify the status of anatomical and functional elements of the joint. This enables the most precise identification of the presence or absence of pathological conditions of the knee joint, the choice of rational methods of treatment, rehabilitation and prevention. The proposed formalization of the behavior of the knee joint is a correct, generalized, due to the categorical description, and at the same time allows the desired specification, defined by the individualization of the object itself.

---

Keywords: the knee joint, categorical model, load distribution, biomechanical characteristics.

С морфо-физиологической точки зрения коленный сустав представляет собой сложную систему в структурном и функциональном отношениях [1, 4]. Все элементы сустава являются нелинейными физическими средами. Подвижность коленного сустава определяет характер пространственного поведения остальных элементов опорно-двигательного аппарата человека. Наконец, следует отметить, что любые анатомо-биомеханические показатели, характеризующие сустав, строго индивидуализированы [2]. В связи с этим чрезвычайно актуален корректный подход к выбору лечебно-диагностических и реабилитационных

мероприятий с учетом индивидуальных особенностей, что в значительной мере определяется решением следующих задач [7,8]:

1. Описанием фазового пространства наблюдения коленного сустава и выбором информационных параметров для осуществления системного подхода в рамках измерительного процесса;
2. Синтезом структурной модели силовых взаимодействий между элементами коленного сустава;
3. Распределением аналитических формализмов описания силовых контактов элементов коленного сустава.

### Материалы и методы исследования

Корректный выбор лечебно-диагностических и реабилитационных мероприятий за счет управления силовыми взаимодействиями элементов сустава целесообразно объективизировать введением модели диагностируемого состояния [3]:

$$M_{офс} = \{M_{фус}, M_{оон}, M_{фк}, M_{уфс}, M_{сн}\}, (1)$$

где  $M_{офс}$  - модель диагностируемого физиологического состояния;  $M_{фус}$  - модель физиологической функциональной системы (ФФС);  $M_{оон}$  - модель области определения ФФС;  $M_{фк}$  - модель физиологических констант;  $M_{уфс}$  - модель условий функционирования;  $M_{сн}$  - модель системного параметра.

На основании анатомической схемы коленного сустава (1) возможно составить блок-схему структуры взаимодействий между его элементами (рис. 1).

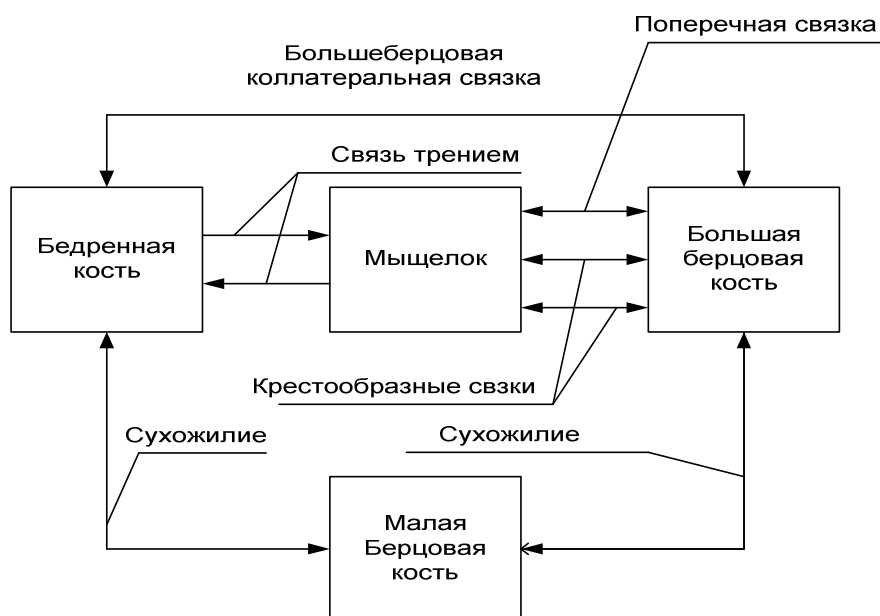
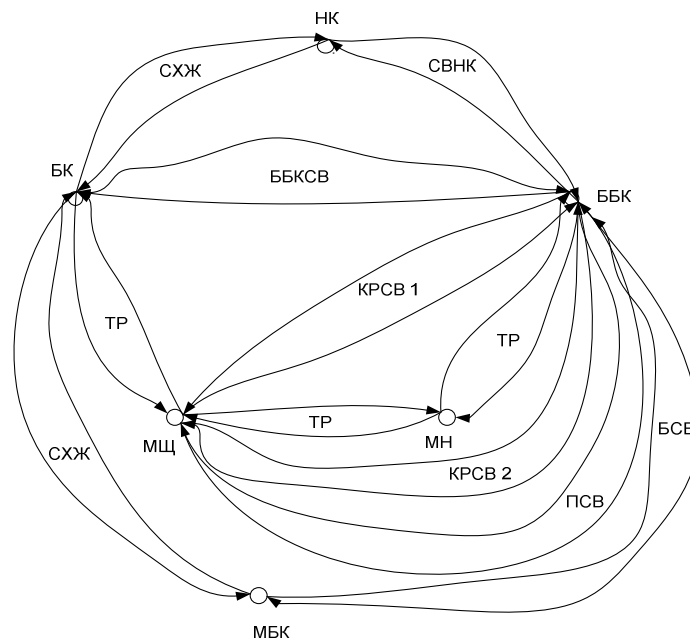


Рис. 1. Структура межэлементных взаимодействий

Формальным изображением структуры межэлементных взаимодействий является граф следующего вида:



(2)

Здесь приняты следующие обозначения: КРСВ<sub>1,2</sub> – крестообразные связи 1 и 2 соответственно; ПСВ – поперечная связь; СХЖ – сухожилие; Тр – трение; БК – бедренная кость; МЦ – мыщелок; ББК – большая берцовая кость; МК – малая берцовая кость; МН – мениск; БККСВ – большеберцовая коллатеральная связка; НК – надколенник; СВНК – связка надколенника; БСВ – бедренная связка.

С помощью графа (2) можно составить категорию систему [3] силовых межэлементных взаимодействий:

$$\left. \begin{aligned}
 M_{\overline{BK}NK} &\subset (BK, NK) \cup (NK, BK), \\
 M_{\overline{BK}BK} &\subset (BK, BK) \cup (BK, BK), \\
 M_{\overline{BK}MC} &\subset (BK, MC) \cup (MC, BK) \\
 M_{\overline{MC}MN} &\subset (MC, MN) \cup (MN, MC) \\
 M_{\overline{MC}BK1} &\subset (MC, BK)_1 \cup (BK, MC)_1 \\
 M_{\overline{BK}MN} &\subset (BK, MN) \cup (MN, BK) \\
 M_{\overline{BK}MK} &\subset (BK, MK) \cup (MK, BK) \\
 M_{\overline{BK}MK} &\subset (BK, MK) \cup (MK, BK) \\
 M_{\overline{MC}BK2} &\subset (MC, BK)_2 \cup (BK, MC)_2 \\
 M_{\overline{MC}BK3} &\subset (MC, BK)_3 \cup (BK, MC)_3
 \end{aligned} \right\} (3)$$

Здесь индексы 1,2,3 у категорий  $(МЦ, БК)_i \cup (БК, МЦ)_i$  соответствуют первой и второй крестообразным связкам (индексы 1 и 2) и поперечной связке (индекс 3). Поскольку элементы БК, ББК, МЦ, МН, НК и МБК входят в тот или иной комбинации во все категории системы (3), постольку эта система корректно адекватна модели функциональной системе  $M_{зус}$ .

Категория (3) может быть дополнена информацией о типах связи структурных элементов и типах нагружения соединительных элементов. С этой целью строятся матрицы типов связи и типов нагружения:

**Таблица 1**

Матрица типов связи

	БК	МЦ	ББК	МБК
БК		Связь трением	Коллатеральная связка	Сухожилие
МЦ	Связь трением		Крестообразная и поперечная связки	
ББК	Коллатеральная связка	Крестообразная и поперечная связки		Сухожилие
МБК	Сухожилие		Сухожилие	

**Таблица 2**

Матрица типов нагружения

	БК	МЦ	ББК	МБК
БК		Трение скольжения; сжатие	Деформация растяжения	Деформация растяжения
МЦ	Сжатие		Реакция на срез, реакция на сжатие	
ББК	Реакция на растяжение	Трение среза, реакция на сжатие		Растяжение, кручение
МБК	Реакция на растяжение/кручение		Реакция на растяжение/кручение	

Всякая модель предполагает использование числовых характеристик её отдельных элементов, их характер и рисунок распределения на модели. В данном случае назначение числовых величин основывается на том, что связки – это плотные соединительно-тканые тяжи и пластины, соединяющие кости скелета или отдельные органы. Располагаясь преимущественно в области суставов, укрепляют их, ограничивают или направляют движение в суставах. При этом все связки имеют физические характеристики в соответствии с их индивидуальным назначением.

Содержанием модели области определения  $M_{зон}$  являются интервалы значений каждого компонента системы (3), которые обозначим следующим образом:

$$M_{зон} = \{ \langle \overline{BK}_{min}, \overline{BK}_{max} \rangle \}; \{ \langle \overline{HK}_{min}, \overline{HK}_{max} \rangle \}; \{ \langle \overline{BBK}_{min}, \overline{BBK}_{max} \rangle \}; \\ \{ \langle \overline{MШ}_{min}, \overline{MШ}_{max} \rangle \}; \{ \langle \overline{MH}_{min}, \overline{MH}_{max} \rangle \}; \{ \langle \overline{MBK}_{min}, \overline{MBK}_{max} \rangle \}. \quad (4)$$

Здесь  $\{ \langle \overline{BK}_{min}, \overline{BK}_{max} \rangle_i \}$  означает комплекс конкретных значений, что соответствует употреблению записи  $\langle . \rangle$ , семейств параметров, что обозначено штриховой линией над именем элемента, угловые скобки имеют свой порядковый индекс  $i$ . Фактор семейства обозначен фигурными скобками. Среди подобных параметров следует отметить, прежде всего, модуль упругости материала элемента:  $E_{BK}$ , например.

Модель  $M_{фк}$  представляет собой совокупность неизменных констант, характеризующих элементы объекта, то есть коленного сустава, в геометрическом или физическом отношении:

$$M_{фк} = \{ \langle \overline{BK} \rangle_{const}, \langle \overline{HK} \rangle_{const}, \langle \overline{BBK} \rangle_{const}, \langle \overline{MШ} \rangle_{const}, \langle \overline{MH} \rangle_{const}, \langle \overline{MBK} \rangle_{const} \}. \quad (5)$$

Модель  $M_{усф}$  содержит перечень разнообразных условий, при которых соблюдается стабильность функционирования коленного сустава и перечисляются допустимые границы этих условий.

Модель системного параметра  $M_{сн}$  содержит имя параметра или параметров, измерения которого (или которых) позволяет объективно оценивать физиологическую функциональную систему (ФФС), а также уравнение измерительной процедуры, так как это сделано, например, в (3), (4). При детализации поведения сустава в фазовом силовом пространстве нужно для каждого его элемента разместить центр координатной системы и рассматривать перемещение каждого элемента под воздействием внешних относительно элементов сил.

Основанием для определения положения систем координат нагружения взаимодействующими парами служит граф (2). Все взаимодействующие пары реализуют удержание общего равновесия тела в пространстве, и вектор взаимодействия имеет произвольное текущее направление, однако, оси координат всех координатных систем коллинеарны между собой и результирующей системе. Поэтому в данном случае целесообразно организовать системы координат относительно всех пар взаимодействий. С учетом сказанного результирующий вектор силовых взаимодействий пар можно представить следующим образом:

$$\overline{F}_{СП} = \overline{F}_{BK/MШ} + \overline{F}_{BK/BBK} + \overline{F}_{BK/MBK} + \overline{F}_{MШ/BBK} + \overline{F}_{BBK/MBK}. \quad (6)$$

Функционал каждой векторной компоненты определяется в соответствии с таблицами матриц типов соединения между элементами (табл. 1) и типов нагружения (табл. 2) соединительных элементов. Области определения и существования функционалов, а также коэффициенты и параметры принимаются в соответствии с моделями (4) и (5). Начальные и граничные условия для функционалов из (6) назначаются по модели  $M_{y\phi C}$ .

С учетом (6) можно написать  $M_{СП} = \bar{F}_{СП}$ . (7).

### **Выводы**

Таким образом, категорная модель коленного сустава человека позволяет объективизировать состояние анатомо-функциональных элементов сустава. Это дает возможность наиболее четко выявлять наличие или отсутствие патологических состояний коленного сустава [5,6], осуществлять выбор рациональных методов лечения, реабилитации и профилактики.

Предложенная формализация поведения коленного сустава является корректной, обобщенной, благодаря категорному описанию, и в то же время допускает требуемую конкретизацию, определяемую индивидуализацией самого объекта. Она предполагает четкую последовательность анализа физиологического состояния объекта и способствует развитию информационных технологий в рамках лечебных и реабилитационных технологий.

### **Список литературы**

1. Анатомия человека /под редакцией Сапина М.Р. – М. «Медицина», 2001.
2. Безбородов С.А. ПТК для определения биомеханических характеристик коленного сустава. Автореферат кандидатской диссертации – Волгоград 2011 г. – 18 с.
3. Букур И., Деляну А. Введение в теорию категорий. – М.: Издание «Мир», 1972. – 259 с.
4. Воробьев А.А., Колмаков А.А., Безбородов С.А., Баринов А.С., Царьков П.С., Алборов А.Ц. Новые анатомо-функциональные характеристики нижних конечностей человека // Вестник Волгоградского государственного медицинского университета. – 2013. – № 2 (46). – С. 20-24.
5. Воробьев А.А., Муха Ю.П., Баранов А.С., Безбородов С.А., Колмаков А.А., Егин М.Е. Методика определения индивидуального распределения нагрузки на коленный сустав // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2008. – № 4. – С. 54-59.
6. Воробьев А.А., Поройский С.В., Егин М.Е., Колмаков А.А., Безбородов С.А. Возможности новых информационных технологий в клинической анатомии // Вопросы реконструктивной и пластической хирургии. – 2007. – № 3-4. – С. 37-38.

7. Колмаков А.А. Взаимосвязь прижизненных анатомических и биомеханических параметров коленных суставов при различных формах нижних конечностей. Автореферат кандидатской диссертации. – Волгоград, 2013.

8. Колмаков А.А., Безбородов С.А., Баринов А.С., Чеканин И.М., Поздняков А.М., Алборов А.Ц. Обоснование возможностей применения новых анатомо-функциональных характеристик нижних конечностей человека // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 5; URL: [www.science-education.ru/128-22239](http://www.science-education.ru/128-22239).

**Рецензенты:**

Маланин Д.А., д.м.н., профессор, заведующий кафедрой травматологии, ортопедии и ВПХ с курсом травматологии и ортопедии ФУВ, ГБОУ ВПО «Волгоградский государственный медицинский университет» Минздрава России, г. Волгоград;

Гущин А.В., д.м.н., доцент кафедры биотехнических систем и технологий, ГБОУ ВПО «Волгоградский государственный медицинский университет» Минздрава России, г. Волгоград.