

## **ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОНАЦИОННО-СУПИНАЦИОННЫХ ДВИЖЕНИЙ ПРЕДПЛЕЧЬЯ КАК ЗАЛОГ ПОНИМАНИЯ РОТАЦИОННОЙ ПОДВИЖНОСТИ ЛОКТЕВОЙ КОСТИ В ДИСТАЛЬНОМ ЛУЧЕЛОКТЕВОМ СУСТАВЕ**

Проценко Я.Н.<sup>1</sup>, Семенов С.Ю.<sup>1,2</sup>, Сигарева Ю.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии и ортопедии имени Г.И. Турнера» Министерства здравоохранения РФ, Санкт-Петербург, e-mail: sergey2810@yandex.ru;

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова» Министерства здравоохранения РФ, Санкт-Петербург

В статье представлена биомеханика ротационных движений предплечья и дана визуальная интерпретация. С целью уточнения достоверного понимания ротационных движений предплечья нами проведена визуализация кинезиологической траектории движения предплечья. Исследование выполнено фотокамерой Nikon 3200 в непрерывном режиме 4 кадра в секунду. Фотосъемка объекта осуществлялась спереди, сзади и сбоку. Эта съемка представляла собой регистрацию движений предплечья в заданной плоскости, перпендикулярной оптической оси аппарата. Последующий анализ полученных циклограмм о траектории движения предплечья во время выполнения пронационно-супинационных движений представлен в биомеханической модели перемещения локтевой и лучевой кости. Наглядно показана собственная траектория локтевой кости, которая является подвижным элементом дистального лучелоктевого сустава и неотъемлемой частью сложного динамического процесса – биомеханики пронационно-супинационных движений предплечья. Локтевая кость в дистальном отделе изменяет свое положение относительно лучевой кости за счет ротационного перемещения. Очень важно сохранить и восстановить поврежденную верхнюю конечность с учетом всех анатомических элементов, причастных к ротационным движениям, и особенностей каждого элемента. Правильное понимание роли костей предплечья в обеспечении пронационно-супинационных движений является залогом успешного лечения пациентов с патологией верхней конечности.

Ключевые слова: биомеханика, пронация, супинация, локтевая кость, траектория движения, дистальный лучелоктевой сустав.

## **VISUALISATION OF PRONATION-SUPINATION MOVEMENTS OF THE FOREARM AS A KEY FOR UNDERSTANDING THE ROTATIONAL MOBILITY OF THE ULNA IN THE DISTAL RADIOULNAR JOINT**

Proshchenko Y.N.<sup>1</sup>, Semenov S.Y.<sup>1,2</sup>, Sigareva Y.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>H. Turner National Medical Research Center for Children's Orthopedics and Trauma Surgery, Saint Petersburg, e-mail: sergey2810@yandex.ru;

<sup>2</sup>North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Saint Petersburg

The article presents the biomechanics of rotational movements of the forearm and provides its visual interpretation. We visualized the kinesiological trajectory of the forearm movement in order to clarify the understanding of rotational movements of the forearm. We carried out the study with a Nikon 3200 camera in a continuous mode of 4 frames per second. The subject was photographed from the front, back and side. We registered movements of the forearm in the plane perpendicular to the optical axis of the camera. The subsequent analysis of the obtained cyclograms on the trajectory of movement of the forearm during pronation-supination movements is presented in the biomechanical model of movements of the ulna and radius. That showed the trajectory of the ulna, which we may be a movable element of the distal radioulnar joint. Ulna is able to change its position relative to the radius due to rotational movements. We showed the own trajectory of the ulna, which may be considered as a movable element of the distal radioulnar joint and an integral part of a complex dynamic process – the biomechanics of pronation-supination movements of the forearm. The distal part of ulna changes its position relative to the radius due to rotational movement. It is highly important to preserve and restore the damaged upper limb, taking into account all the anatomical elements involved in rotational movements and the characteristics of each element. Correct understanding the role of forearm bones in providing pronation-supination movements is the key for a successful treatment of patients with upper limb pathology.

Keywords: biomechanics, ulna, pronation, supination, motion path, distal radioulnar joint.

Традиционно авторы [1, 2] описывают три сустава, которые участвуют в ротационных движениях предплечья: проксимальный и дистальный лучелоктевые суставы, а также плечелучевой за счет передачи вращательного момента плечевой кости. Проксимальный лучелоктевой сустав (ПЛЛС) представлен головкой лучевой кости, лучевой вырезкой локтевой кости и кольцевой связкой. Дистальный лучелоктевой сустав (ДЛЛС) представляет собой диартродиальное сочленение между головкой локтевой кости и сигмовидной вырезкой лучевой кости [3, 4]. Одним из основных стабилизаторов ДЛЛС является треугольный фиброзно-хрящевой комплекс (ТФХК). Группой авторов [5] описан средний лучелоктевой сустав, который состоит из диафизов локтевой и лучевой костей, соединенных межкостной мембраной. Этот сустав, в отличие от цилиндрических проксимального и дистального лучелоктевых суставов, является особым видом синдесмоза. Межкостная мембрана костей предплечья играет одну из ключевых ролей в стабилизации лучелоктевых суставов и ротационных движениях предплечья.

Движение и стабильность трех компонентов, отвечающих за ротационные движения (проксимальный и дистальный лучелоктевые суставы, межкостная мембрана), тесно переплетены. Ротационные движения предплечья могут быть сохранены даже при резекции одного из трех компонентов, обеспечивающих пронацию и супинацию. Это клинически демонстрирует эффективность таких вмешательств, как резекция головки лучевой либо локтевой кости с возможностью сохранения пронационно-супинационных движений [1]. Однако наличия изолированной тугоподвижности одного из компонентов достаточно, чтобы нарушить вращательные движения предплечья, как это происходит при патологиях, затрагивающих проксимальный лучелоктевой сустав (врожденный радиоульнарный синостоз), дистальный лучелоктевой сустав (посттравматический синостоз, инфекционно-воспалительные процессы), межкостную мембрану предплечья (рубцовая контрактура).

Роль пронации и супинации существенна в контроле оптимального положения и перемещения кисти для захвата предметов и взаимодействия с ними в повседневной активности человека (для осуществления функции питания, функций соблюдения личной гигиены) [1, 2]. Для выполнения основных функций кисти необходима возможность ее позиционирования в любой точке трехмерного пространства под любым углом [1]. Это обеспечивается за счет комплекса ротационных движений в сочетании со сгибанием и разгибанием в кистевом и локтевом суставах [2]. Вращение предплечья – это не простое шарнирное движение, а сложная комбинация вращательной и поступательной составляющих [6].

При анализе научных публикаций о достоверных методах визуальной оценки пронационно-супинационных движений предплечья было выявлено, что в литературе

отсутствует единый универсальный алгоритм определения ротационной подвижности локтевой и лучевой костей [7].

В процессе исследования функциональной биомеханики предплечья И.А. Козлов, В.Ф. Коршунов и Л.И. Шелухина усомнились в достоверности вывиха головки локтевой кости в дистальном лучелоктевом суставе, тем самым внесли противоречия в сложившиеся представления о подвижности костей в дистальном лучелоктевом суставе. Авторы [8] утверждают, что происходит вывих именно лучевой кости в дистальном отделе, а не локтевой кости, которая остается неподвижной. В.Ю. Никитин и М.П. Ломая отмечают, что неподвижность локтевой кости в горизонтальной плоскости определена анатомическим строением компонентов локтевого сустава, что исключает ее ротационные движения [9]. Не внес ясности в процесс кинематики лучевой и локтевой кости и признанный ученый в этой области А.И. Капанджи. Он рассматривает подвижность лучевой кости относительно локтевой, при этом оговаривает, что гипотетически и локтевая кость также обладает определенной степенью подвижности, хотя описывает пронационно-супинационный механизм относительно неподвижной локтевой кости [2].

Возникает закономерный вопрос о том, как правильно визуализировать ротационные движения предплечья.

**Цель исследования** – представить визуальную методику оценки пронационно-супинационных движений предплечья.

#### **Материал и методы исследования**

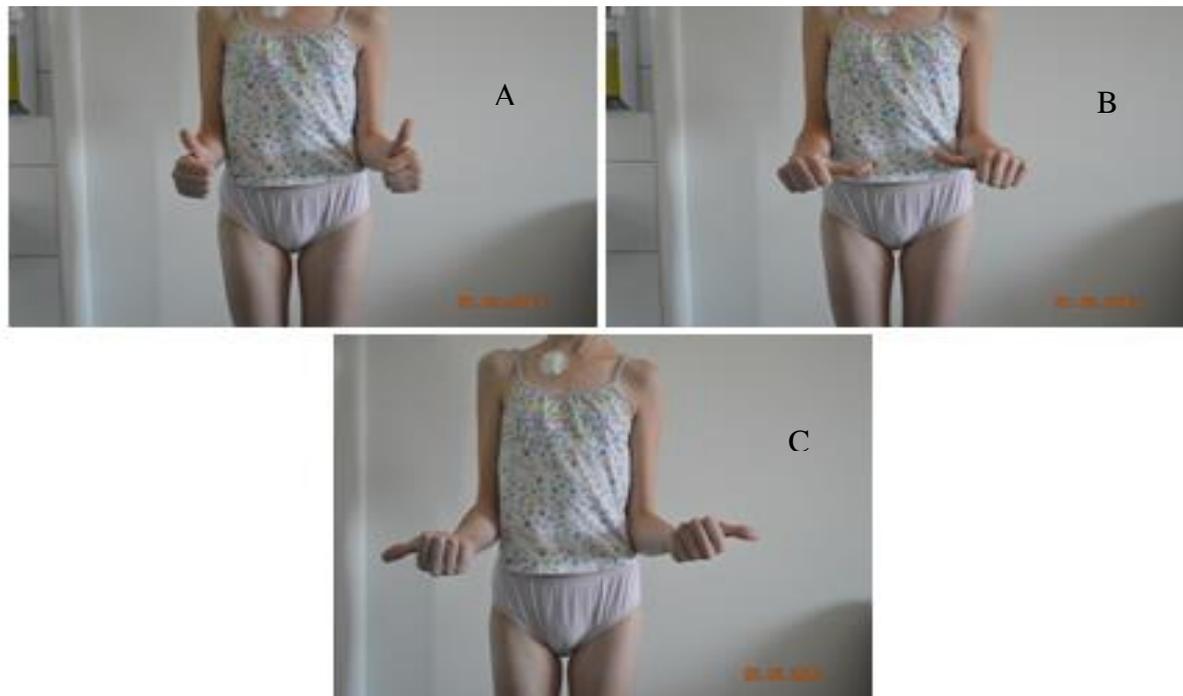
Визуализацию и фиксацию ротационных движений у здорового добровольца проводили методом циклографии с помощью фотограмметрии. Исследование проводилось фотокамерой Nikon 3200 в непрерывном режиме 4 кадра в секунду. Фотосъемка объекта выполнялась спереди, сзади и сбоку. Эта съемка представляла собой регистрацию движений предплечья в заданной плоскости, перпендикулярной оптической оси аппарата.

Полученные на основе анализа циклограмм данные о траектории движения предплечья во время выполнения пронационно-супинационных движений были представлены в виде номограмм для получения реальных (действительных) координат любой фиксированной точки на сегменте или суставе конечности. Данный перенос на плоскость в систему координат позволил уточнить траекторию движения.

#### **Результаты исследование и их обсуждение**

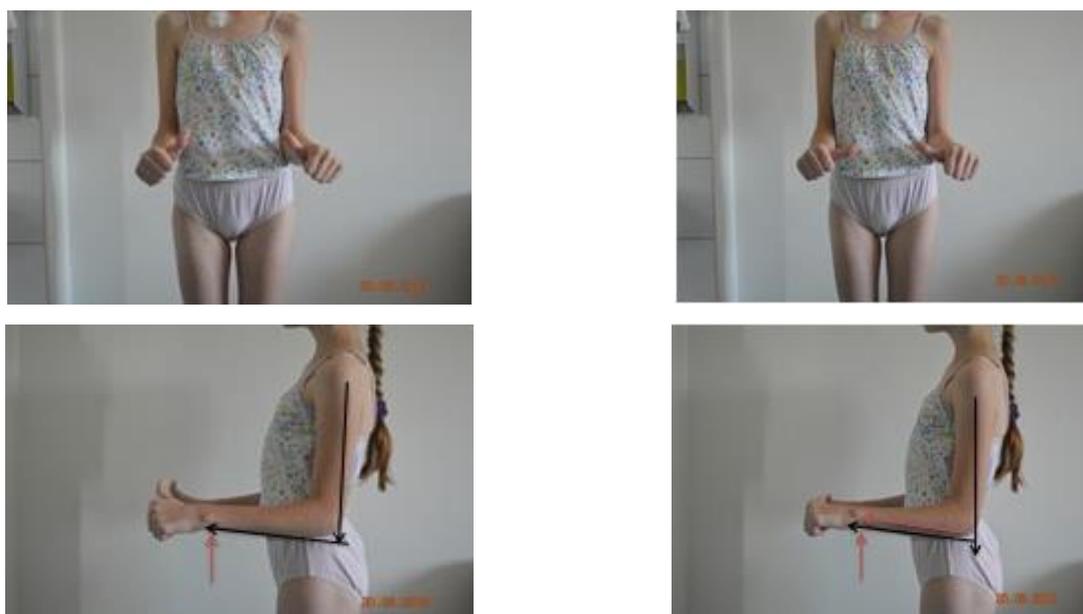
Перемещение и позиционирование кисти в пространстве как ключевые функции верхней конечности обусловлены биомеханическим взаимодействием изменения положения костей предплечья как в кистевом, так и в локтевом суставах, которые имеют сложное анатомическое строение.

Следует учитывать, что рассматриваемые движения предплечья выполняются из среднего положения при согнутом до  $90^\circ$  локтевом суставе (рис. 1), а ось вращения проходит через кисть, дистальный и проксимальный лучелоктевые суставы.



*Рис. 1. Кинематика пронационно-супинационных движений: А – исходное (нейтральное) положение, В – пронация, С – супинация*

Перемещение дистального отдела локтевой кости во время ротационных движений происходит по сложной траектории. Сначала описывается полукруг вверх и наружу, в результате чего осуществляется пронация (рис. 2, 3).



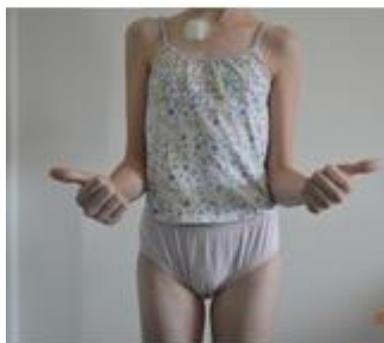


*Рис. 2. Пронация предплечья. Перемещение локтевой кости вверх и наружу*



*Рис. 3. Пронация предплечья. Автоматическая ротация плеча – второй элемент вращения локтевой кости*

Далее из среднего положения дистальный отдел локтевой кости смещается вверх и внутрь, в результате происходит супинация (рис. 4, 5, 6).



*Рис. 4. Исходное положение*

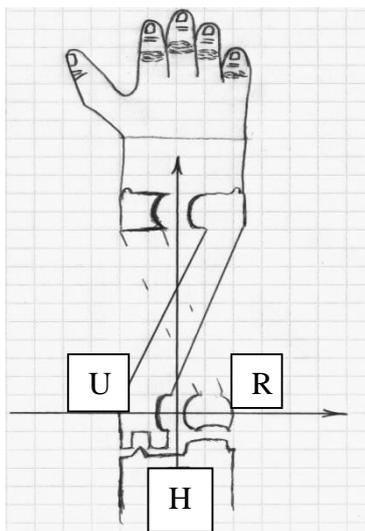
*Рис. 5. Супинация предплечья. Перемещение локтевой кости*

*Рис. 6. Супинация предплечья. Перемещение локтевой*

*вверх и внутрь.*  
*Автоматическая ротация*  
*плеча – второй элемент*  
*вращения локтевой кости*

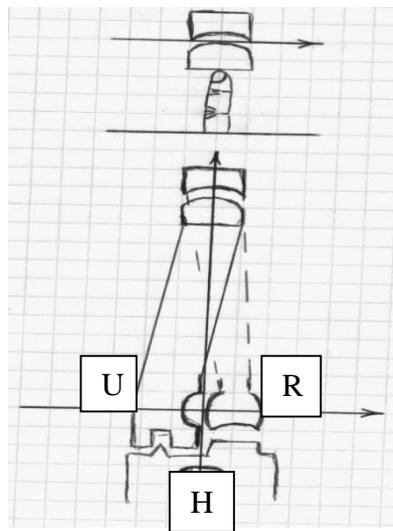
*кости вверх и внутрь.*  
*Автоматическая ротация*  
*плеча – второй элемент*  
*вращения локтевой кости*

Локтевая кость в дистальном отделе имеет физиологическое вальгусное отклонение и вместе с лучевой костью образует форму двояковыпуклой сферы, что позволяет лучевой кости ротироваться относительно локтевой в горизонтальной плоскости, а головке локтевой кости за счет сгибания-разгибания в плечелоктевом суставе – смещаться относительно лучевой кости, занимая крайние положения пронации и супинации в пределах 8–9° (рис. 7А-7В).



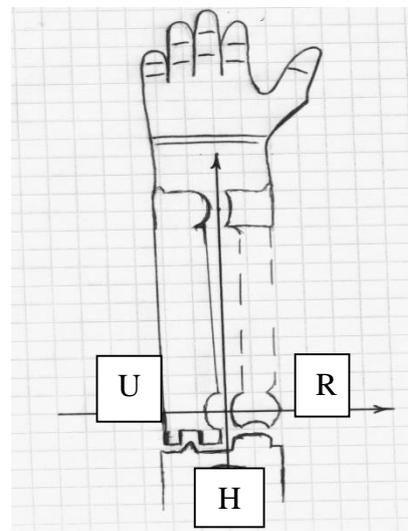
*Рис. 7А*

*Положение пронации*



*Рис. 7Б*

*Среднее положение*



*Рис. 7В*

*Положение супинации*

Ротацию предплечья целесообразно изучать только при прижатом к туловищу локтевом суставе, согнутом под углом 90°, что позволяет стандартизировать оценку ротационных движений и исключить влияние компенсаторных механизмов. Так, в положении разгибания предплечье оказывается на одной линии с плечом, и осевая ротация предплечья совершается вместе с плечевой костью благодаря ротационным движениям в плечевом суставе.

Вращение предплечья можно рассматривать как вращение лучевой кости вокруг «неподвижной» локтевой кости. Однако лучевая кость вращается вокруг собственной оси и вокруг центра вращения предплечья. Важно отметить, что предплечье также вращается из-за движений плеча, которое обладает автоматической ротацией, передающейся на предплечье через блоковидный плечелоктевой сустав. Так как локтевая кость функционально является продолжением плечевой кости, то ротируется весь единый комплекс, что приводит к

наружному смещению головки локтевой кости (рис. 1–7).

Таким образом, необходимо различать вращение предплечья вокруг «неподвижной» локтевой и вращение предплечья с подвижной локтевой костью. Это концептуальное различие является искусственным, поскольку в повседневных движениях человек использует оба этих механизма в синергии [1, 2].

P. Daneshvar с соавторами (2020), изучая ротационную анатомию лучевой и локтевой костей, проанализировали компьютерные 3D-томограммы 98 предплечий кадавров. Вращение локтевой кости оценивали путем определения ориентации головки локтевой кости по отношению к ее проксимальному отделу: в диапазоне от  $50,3^\circ$  пронации до  $22^\circ$  супинации, головка локтевой кости пронируется на  $8,4^\circ \pm 14,9^\circ$  относительно сигмовидной вырезки лучевой кости [10].

S. Omori с соавторами (2016) в ретроспективном случай-контроль исследовании биомеханики предплечья и локтевого сустава при ротационных движениях с применением данных компьютерной томографии выявили, что локтевая кость при пронации предплечья значительно отклоняется, несколько ротируясь в сторону вальгуса, а самая глубокая точка гребня блоковой вырезки в сагиттальной плоскости транслируется медиально. При этом контакт суставных поверхностей проксимального отдела локтевой кости и блока плечевой кости значительно не меняется как при пронации, так и при супинации [11].

YR Chen с соавторами (2013), исследуя кинематику дистального лучелоктевого сустава *in vivo* с использованием трехмерных компьютерных томограмм, определяли скольжение сигмовидной вырезки лучевой и головки локтевой костей друг относительно друга. Во время ротации предплечья (амплитуда движений – от  $30^\circ$  пронации до  $60^\circ$  супинации) скольжение головки локтевой кости по сигмовидной вырезке составило 4,7 мм во время пронации и 2,3 мм во время супинации [4].

Группа ученых [6] в исследовании на здоровых добровольцах нормальной кинематики предплечья с применением флюороскопии выявили, что головка локтевой кости во время пронационных движений транслируется дорзально по отношению к лучевой кости, ось ротации проходит через заднелатеральную часть головки локтевой кости, а точка проекции оси ротации в дистальном лучелоктевом суставе во время вращения предплечья перемещается.

В более раннем исследовании P. Kasten с соавторами (2004) оценивали кинематику локтевой кости во время проносупинации в экспериментальных условиях на кадаверном материале. Было продемонстрировано, что во время ротационных движений локтевая кость совершает движение по дугообразной наклонной траектории с первоначальным варусным сдвигом, затем смещается дорзально, а после отмечается вальгусная трансляция. Ротация

локтевой кости при этом, по данным авторов, составила в среднем 3,2° [12].

Имеющиеся литературные данные соотносятся с нашими наблюдениями траектории движения локтевой кости во время пронационно-супинационных движений предплечья.

### **Заключение**

Локтевая кость является подвижным элементом дистального лучелоктевого сустава и неотъемлемой частью сложного динамического процесса – биомеханического взаимодействия анатомических элементов предплечья во время пронационно-супинационных движений. Подвижность дистального отдела локтевой кости зависит от анатомической кривизны и длины костей предплечья, правильных анатомических взаимоотношений в локтевом и кистевом суставах, ротации плечевой кости. Поэтому очень важно сохранить и восстановить поврежденную верхнюю конечность с учетом всех анатомических элементов, причастных к ротационным движениям, и особенностей каждого элемента.

Правильное понимание роли костей предплечья в обеспечении пронационно-супинационных движений является залогом успешного лечения пациентов с патологией верхней конечности.

### **Список литературы**

1. Soubeyrand M., Assabah B., Bégin M., Laemmel E., Dos Santos A., Crézé M. Pronation and supination of the hand: Anatomy and biomechanics. *Hand Surg Rehabil.* 2017. Vol. 36 (1). P. 2-11. DOI: 10.1016/j.hansur.2016.09.012.
2. Капанджи А.И. Верхняя конечность. Физиология суставов / Пер. с англ. Г.М. Абелевой, Е.В. Кишневского. М.: Эксмо, 2019. 368 с.
3. Huang J.I., Hanel D.P. Anatomy and biomechanics of the distal radioulnar joint. *Hand Clin.* 2012. Vol. 28 (2). P. 157-163. DOI: 10.1016/j.hcl.2012.03.002.
4. Chen Y.R., Tang J.B. In Vivo Gliding and Contact Characteristics of the Sigmoid Notch and the Ulna in Forearm Rotation. *J. Hand Surg.* 2013. Vol. 38A. P. 1513-1519. DOI: 10.1016/j.jhsa.2013.04.023.
5. Soubeyrand M., Wassermann V., Hirsch C., Oberlin C., Gagey O., Dumontier C. The middle radioulnar joint and triarticular forearm complex. *J. Hand Surg Eur.* 2011. Vol. 36. P. 447-454.
6. Matsuki K.O., Matsuki K., Mu S., Sasho T., Nakagawa K., Ochiai N., Takahashi K., Banks S.A. In vivo 3D kinematics of normal forearms: analysis of dynamic forearm rotation. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2010. Vol. 25 (10). P. 979-983. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2010.07.006.

7. Прощенко Я.Н. Вывих головки локтевой кости у детей – заблуждение или реальность? Дистальный лучелоктевой сустав: биомеханика и функциональная анатомия // Детская хирургия. 2014. № 2. С. 43-45.
8. Козлов И.А., Коршунов В.Ф., Шелухина Л.И. Застарелые вывихи и переломовывихи лучевой кости в дистальном лучелоктевом суставе и их лечение // Ортопед, травматол. протез. 1989. № 1. С. 49-51.
9. Никитин В.Ю., Ломая М.П. Паллиативные операции при лечении застарелых повреждений и заболеваний дистального лучелоктевого сочленения // Травматология и ортопедия России. 2007. № 2 (44). С. 74-77.
10. Daneshvar P., Willing R., Lapner M., Pahuta M.A., King G.J.W. Rotational Anatomy of the Radius and Ulna: Surgical Implications J. Hand Surg Am. 2020. Vol. 1 (1). P. 1082.e1-1082.e9. DOI: 10.1016/j.jhsa.2020.04.018.
11. Omori S., Miyake J., Oka K., Tanaka H., Yoshikawa H., Murase T. In vivo three-dimensional elbow biomechanics during forearm rotation. J. Shoulder Elbow Surg. 2016. Vol. 25 (1). P. 112-119. DOI: 10.1016/j.jse.2015.07.002.
12. Kasten P., Krefft M., Hesselbach J., Weinberg A.M. Kinematics of the ulna during pronation and supination in a cadaver study: implications for elbow arthroplasty. Clin. Biomech (Bristol, Avon). 2004. Vol. 19 (1). P. 31-35. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2003.08.006.