

ВИРТУАЛЬНЫЙ ПРОТОКОЛ В ПРЕДОПЕРАЦИОННОМ ПЛАНИРОВАНИИ ТОТАЛЬНОГО ЭНДОПРОТЕЗИРОВАНИЯ КОЛЕННОГО СУСТАВА

Филиппова А.В.¹, Хурцилава О.Г.¹, Пташников Д.А.^{1,2}

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, e-mail: dr.anastasia3d@gmail.com;

²Федеральное государственное бюджетное учреждение «Российский орден Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт травматологии и ортопедии имени Р.Р. Вредена» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург

В современном мире, где стремительно развиваются трёхмерные технологии, использование только стандартных протоколов планирования и выполнения эндопротезирования коленного сустава является недостаточным. Двухмерность в предоперационном планировании влечет за собой проекционное искажение, что в конечном итоге отразится на расчетах, а следовательно, может негативно повлиять на результаты оперативного лечения в целом. Цель. Усовершенствовать способ предоперационного планирования и выполнения эндопротезирования коленного сустава с использованием методики индивидуального 3D-моделирования и прототипирования индивидуальных резекционных блоков, основанного на совмещении данных КТ и МРТ. Материалы и методы. В рамках данного исследования рассматривались 30 пациентов в возрасте 58-75 лет. Исследование проводилось на компьютерном томографе «Toshiba Aquilion 64» и на магнитно-резонансном томографе «Magnetom Avanto 1.5T Tim I-Class» по специально разработанным протоколам. Выполнялось индивидуальное 3D-моделирование и прототипирование анатомических моделей коленного сустава на 3D-принтере Picaso 250 Pro, а также прототипирование индивидуальных резекционных блоков на 3D-принтере Objet Eden 260. Результаты. В работе представлена разработанная авторская методика нового предоперационного 3D-моделирования эндопротезирования коленного сустава. Выводы. Созданный авторами статьи индивидуальный протокол виртуального предоперационного планирования позволил учитывать индивидуальные антропометрические показатели и особенности каждого пациента, позволяя подобрать необходимые размеры компонентов коленного сустава и учесть опилены бедренной и большеберцовой костей.

Ключевые слова: эндопротезирование, коленный сустав, гонартроз, 3D-моделирование, прототипирование, 3D-печать, референтные углы.

VIRTUAL PROTOCOL IN PREOPERATIVE PLANNING OF TOTAL KNEE ARTHROPLASTY

Filippova A.V.¹, Khurtsilava O.G.¹, Ptashnikov D.A.^{1,2}

¹North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, St. Petersburg, e-mail: dr.anastasia3d@gmail.com;

²Russian Scientific Research Institute of Traumatology and Orthopedics named after R.R. Vreden, St. Petersburg

In today's world, where three-dimensional technology is developing rapidly, the use of only standard protocols for planning and performing knee replacement surgery is insufficient. Two-dimensionality in pre-operational planning entails a projection bias, which will ultimately affect the calculations, and therefore may negatively affect the results of operative treatment in general. Purpose. To improve the method of preoperative planning and implementation of knee joint endoprosthesis using the method of individual 3D modeling and prototyping of individual resection units based on the combination of CT and MRI data. Materials and methods. Within the framework of this study 30 patients aged 58-75 years were considered. The research was carried out on «Toshiba Aquilion 64» CT scanner and on «Magnetom Avanto 1.5T Tim I-Class» MRI scanner with special developed protocols. Individual 3D simulation and prototyping of the anatomical knee joint models on the 3D Picaso 250 Pro printer was performed, as well as prototyping of individual resection units on the 3D Objet Eden 260 printer. Results. The paper presents the developed author's methodology of new pre-operative 3D modeling of knee joint endoprosthesis. Findings. Created by the authors of the article an individual protocol of virtual pre-operational planning, allowed to take into account individual anthropometric indicators and features of each patient, allowing the required dimensions of the components of the knee joint to be adjusted to account for the sawing of the femur and tibia.

Keywords: arthroplasty, knee joint, gonarthrosis, 3D modeling, prototyping, 3D printing, reference angles.

Ежегодно во всем мире число имплантированных ревизионных эндопротезов коленного сустава с каждым годом возрастает, это связано не только с инфекционными осложнениями, но и с ошибками при первичной установке эндопротеза, приводящими к асептической нестабильности компонентов [1]. При каждом ревизионном вмешательстве уменьшается количество костной ткани в результате остеолита, асептического расшатывания и удаления компонентов эндопротеза, тем самым усложняется способ замещения дефектов и фиксации компонентов эндопротеза, повышается риск возникновения нестабильности эндопротеза, что в конечном итоге приводит к ухудшению качества жизни и инвалидизации пациента [2-4]. Поэтому повышение точности выполнения первичного эндопротезирования коленного сустава остается медико-социально значимым [5; 6].

Предоперационное планирование является важным этапом в лечении больного. Стандартное планирование эндопротезирования коленного сустава осуществлялось путем определения референтных линий, углов [7], положения и размеров компонентов эндопротеза коленного сустава по рентгенограммам с использованием трафаретов [8] или программного обеспечения (TraumaCad, BoneNinja, mediCAD и др.). Однако при наличии у больного деформации и/или контрактуры нижней конечности добиться соблюдения правильной укладки больного крайне сложно [1; 9]. При совмещении результатов одноплоскостного планирования и реальной кости пациента зачастую возникали погрешности [10; 11], связанные не только с отклонением механической оси [7] нижней конечности, но и с ошибками в позиционировании стандартных резекционных блоков.

Со временем навигационная система зарекомендовала себя как альтернатива классическому эндопротезированию коленного сустава. Однако, несмотря на явные преимущества, существуют недостатки. В программное обеспечение большинства навигационных систем заложена абстрактная модель коленного сустава. «Реальный» коленный сустав методом регистрации контрольных точек сопоставляется с абстрактной моделью [1; 12; 13]. Ошибки в расчетах и погрешности определения ротации бедренного компонента могут возникнуть при неправильном определении и регистрации контрольных точек, связанных, например, при анкилозе тазобедренного сустава или деформации голеностопного сустава, наличии у пациента метафизарных или диафизарных деформаций нижних конечностей. Кроме того, регистрация контрольных точек увеличивает время оперативного лечения.

Как показывает анализ зарубежной литературы, за последние 30 лет 3D-технологии все больше раскрывают свой потенциал в травматологии и ортопедии, в частности в решении проблем в эндопротезировании коленного сустава. Методика прототипирования позволяет не только виртуально погрузиться в проблему и найти правильное решение, но и реально отточить мануальные навыки на распечатанной модели конкретного больного. В последнее время, по данным литературы, наравне со стандартными методиками и навигацией появился

новый способ выполнения этапов оперативного лечения - индивидуальные резекционные блоки. Однако, несмотря на большие преимущества 3D-технологий, по поводу эндопротезирования коленного сустава на сегодняшний день отсутствует единая концепция виртуального планирования, а следовательно, и самих резекционных блоков. В последних публикациях встречаются противоречивые результаты, касающиеся целесообразности самого метода по сравнению с традиционными методиками. Данные утверждения основаны на ограничениях конфигурации существующих конструкций индивидуальных резекционных блоков, и самого 3D-моделирования в целом [14-16].

На современном уровне развития визуализирующих технологий методика предоперационного 3D-моделирования и прототипирования индивидуальных резекционных блоков требует переосмысления и иного подхода не только к инженерному решению самой конструкции, но и стратегической тактики при выполнении самого эндопротезирования коленного сустава [17].

Целью исследования является усовершенствование способа предоперационного планирования и выполнения эндопротезирования коленного сустава с использованием методики индивидуального 3D-моделирования и прототипирования индивидуальных резекционных блоков, основанного на совмещении данных КТ и МРТ.

Материалы и методы исследования

В рамках данного исследования рассматривались 30 пациентов в возрасте 58-75 лет с гонартрозом различной этиологии III–IV стадии (по классификации Kellgren и Lawrence). Исследование проводилось на компьютерном томографе «Toshiba Aquilion 64» и на магнитно-резонансном томографе «Magnetom Avanto 1.5T Tim I-Class» по специально разработанным протоколам. Используя комплекс адаптированного 3D - программного обеспечения, авторы выполняли индивидуальное 3D-моделирование и прототипирование анатомических моделей коленного сустава на 3D-принтере Picaso 250 Pro, а также прототипирование индивидуальных резекционных блоков на 3D-принтере Objet Eden 260.

В работе представлена разработанная авторская методика нового предоперационного 3D-моделирования эндопротезирования коленного сустава (Патент № 2789960 «Индивидуальный резекционный блок для выполнения опилов бедренной кости при эндопротезировании коленного сустава/ А.В. Филиппова от 28.08.2019»).

Методика предоперационного планирования

Большинство существующих индивидуальных резекционных блоков для эндопротезирования коленного сустава в качестве основы используют данные КТ или МРТ. По качеству полученные после сегментации модели отличаются друг от друга. При использовании данных КТ 3D-модель получается более детализированной и пригодной к последующему планированию, чем при МРТ, однако отсутствие возможности визуализации хрящей повышает риск возникновения ошибок при позиционировании индивидуального

резекционного блока, а также ограничивает предсказуемость уровня опилов. К сожалению, существующие визуализирующие программные обеспечения не создали на сегодняшний день способ, повышающий качество сегментации данных МРТ. Поэтому первоначальной задачей в данном исследовании была разработка технического способа оптимизации данных КТ и МРТ. Полученные данные КТ и МРТ отдельно сегментировались, а затем автоматически сопоставлялись по анатомическим ориентирам (рис. 1).

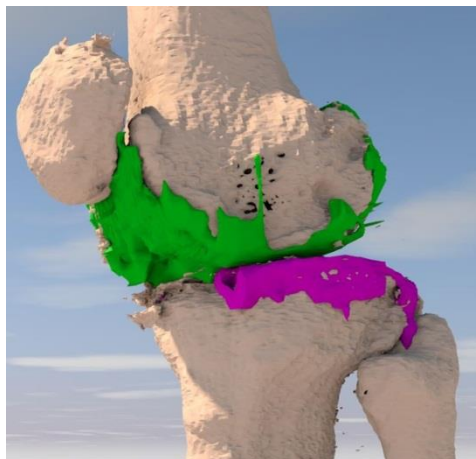


Рис. 1. Визуализация хрящевых структур коленного сустава. Виртуальное совмещение, основанное на данных КТ и МРТ

Затем на полученной трехмерной модели нижней конечности, в режиме «bone», под контролем различных проекций (perspective, right, left, top, front), варьируя прозрачность трехмерной модели, рассчитывали основные референтные углы [7], результаты представлены в таблице и на рисунке 2.

Определение основных референтных углов на трехмерных моделях бедренной и большеберцовой костей

Референтные углы	Результаты
Механический тибioфеморальный угол (mechanical tibiofemoral angle - МТА)	8.8°
Механический медиальный проксимальный большеберцовый угол (mechanical medial proximal tibial angle - mMPTA)	93,3°
Механический латеральный дистальный бедренный угол (mechanical lateral distal femoral angle – mL DFA)	88°
Анатомический феморотибиальный угол (anatomic tibiofemoral angle АТА)	10.4°
Угол наклона большеберцовой кости в сагиттальной плоскости (posterior proximal tibial angle - PPTA)	57.7°
Угол дистального опилов бедренной кости в сагиттальной плоскости (posterior distal femoral angle - PDF A)	92.5°

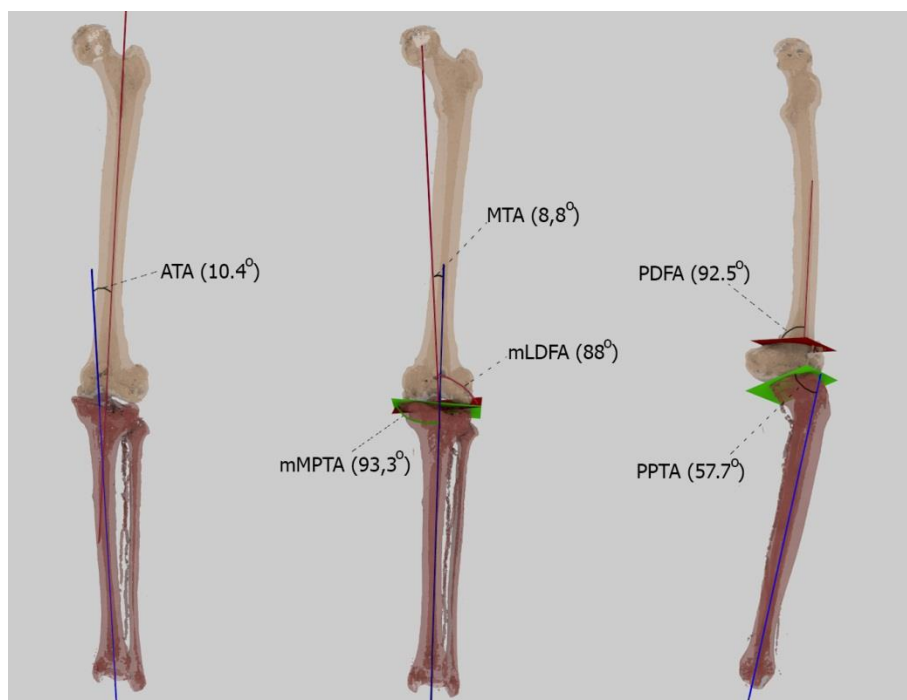


Рис. 2. Референтные углы

Основываясь на полученные результаты, следующим этапом перпендикулярно механической оси проводили плоскость дистального опи́ла бедренной кости. Учитывая особенности данного конкретного случая, выполнили наклон плоскости кзади на 3° . Размер опи́ла от латерального мыщелка бедренной кости, с учетом хрящевой поверхности равен 9,73 мм (рис. 3).

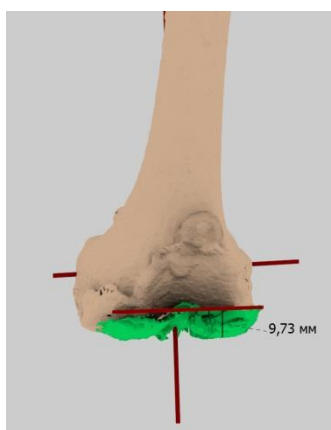


Рис. 3. Дистальный опи́л мыщелка бедренной кости

Затем виртуально проводились передние, задние и косые опи́лы мыщелков бедренной кости (рис. 4).



Рис. 4. Дистальный, передний, задний и косые опиы мыщелка бедренной кости

По предварительным данным, наиболее предпочтительный вариант фирмы-производителя бедренного компонента для данного конкретного случая – например Zimmer, размер D. При позиционировании бедренного компонента учитывается параллельность задних фланцев эндопротеза и чрезнадмыщелковой линии. В конце обязательно оценивалось и проверялось положение надколенника (рис. 5).

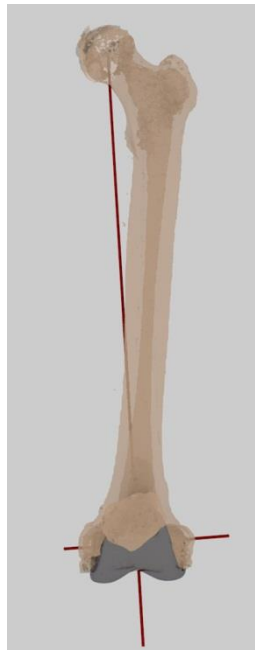


Рис. 5. Позиционирование бедренного компонента эндопротеза коленного сустава

Следующим этапом протокола предоперационного, виртуального планирования является проведение плоскости опиала большеберцовой кости перпендикулярно механической оси, затем ее наклон кзади на 7° , учитывая особенности данного конкретного случая. Размер опиала от латерального мыщелка большеберцовой кости, с учетом хрящевой поверхности, равен 10,26 мм (рис. 6).

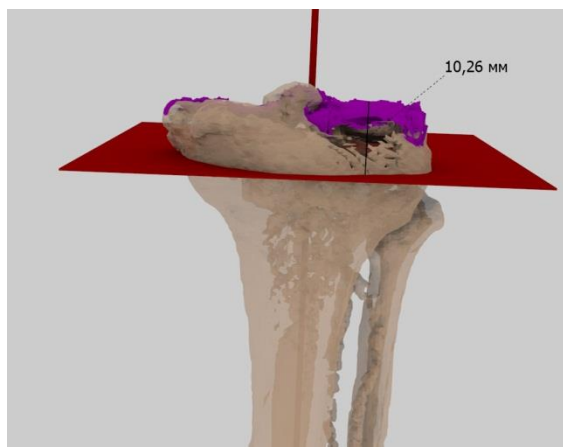


Рис. 6. Опил большеберцовой кости

После остеотомии мыщелка большеберцовой кости позиционируется плато компонента эндопротеза коленного сустава, наиболее предпочтительным вариантом фирмы-производителя является Zimmer № 3, учитывая при этом его ротационное положение (центр эндопротеза ориентирован на внутреннюю треть бугристости большеберцовой кости) (рис. 7).

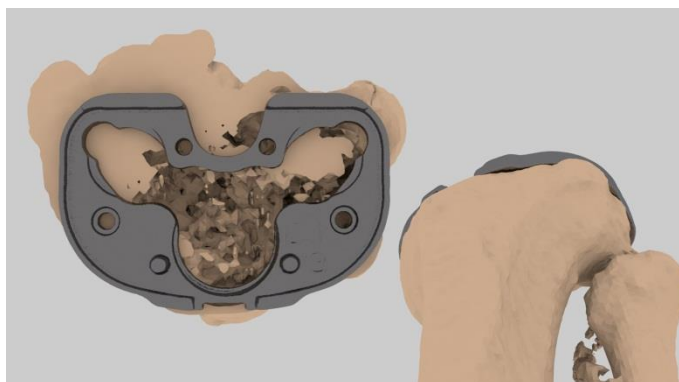


Рис. 7. Позиционирование большеберцового компонента эндопротеза

Результаты исследования и их обсуждение

Новая 3D-технология часто сразу не принимается, если она воспринимается как слишком сложный и не рентабельный процесс. Однако это всего лишь первое ошибочное впечатление. Предоперационное 3D-моделирование активно внедряется в повседневную медицинскую практику, первые разработки в области трехмерного эндопротезирования коленного сустава получили свой старт в 1990 г., с тех пор претерпев видоизменения под влиянием мирового прогресса [10]. Авторы статьи нацелены на дальнейшее усовершенствование технологии оперативного вмешательства, как и все заинтересованные специалисты в области эндопротезирования коленного сустава, чтобы добиться стабильности компонентов эндопротеза, точно восстановить биологическую ось конечности, снизить количество асептических расшатываний имплантов, составляющих от 38,8 до 56,5% случаев, среди других причин ревизий. Поэтому философия нашей методики строится на точности, надежности и индивидуальности.

Выводы

Особое внимание уделяется расчетам основных референтных углов, что позволяет более точно спланировать дальнейшие виртуальные этапы расположения плоскостей опилов и расположения компонентов эндопротеза коленного сустава. Референтные углы в том числе позволят в дальнейшем достоверно оценить отдаленные результаты хирургического лечения. Еще одним преимуществом представленной авторской методики является возможность достоверного определения расположения и размера любой фирмы – производителя эндопротеза, а также прогноза отдаленных результатов.

Сочетание костных и хрящевых структур помогает точно виртуально спрогнозировать безопасный уровень опилов, тем самым исключить ошибки при позиционировании индивидуальных резекционных блоков и минимизировать вероятность изменения уровня опилов во время оперативного вмешательства; данные аспекты и результаты хирургического лечения будут представлены во второй части статьи.

Список литературы

1. Середа А.П., Джавадов А.А., Черный А.А., Билык С.С., Денисов А.О., Шубняков И.И., Корнилов Н.Н., Авдеев А.И., Столяров А.А., Демин А.С., Тихилов Р.М. Наблюдение пациентов после эндопротезирования тазобедренного и коленного суставов: обзор литературы и доклад о пилотном проекте Национального медицинского исследовательского центра травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена // Травматология и ортопедия России. 2023. Т. 29, № 1. С. 60-64. DOI: 10.17816/2311-2905-2020.
2. Жумабеков С.Б., Пронских А.А., Павлов В.В., Корыткин А.А. Хирургическое лечение пациентов с патологией коленного сустава и деформациями нижних конечностей: систематический обзор литературы // Травматология и ортопедия России. 2022. Т. 28, № 1. С. 138-147. DOI: 10.17816/2311-2905-1627.
3. Куляба Т.А., Корнилов Н.Н., Кроитору И.И., Соломин Л.Н., Бовкис Г.Ю., Корчагин К.Л., Иванов П.П. Сколько ревизионных эндопротезирований выполнять до того, как принять решение об артродезе? (клиническое наблюдение пациентки с ревматоидным артритом коленных суставов) // Травматология и ортопедия России. 2018. Т. 24, № 3. С. 113-124. DOI: 10.21823/2311-2905-2018-24-3-113-124.
4. Карякин Н.Н., Малышев Е.Е., Горбатов Р.О., Ротич Д.К. Эндопротезирование коленного сустава с применением индивидуальных направителей, созданных с помощью технологий 3d-печати // Травматология и ортопедия России. 2017. Т. 23, № 3. С. 110-113. DOI: 10.21823/2311-2905-2017-23-3-110-118.
5. Бовкис Г.Ю., Куляба Т.А., Корнилов Н.Н. Компенсация дефектов метаэпифизов бедренной и большеберцовой костей при ревизионном эндопротезировании коленного сустава

- способы и результаты их применения (обзор литературы) // Травматология и ортопедия России. 2016. № 2. С. 101-113. DOI: 10.21823/2311-2905-2016-0-2-101-113.
6. Tanzer Michael, Makhdom Asim M., Preoperative Planning in Primary Total Knee Arthroplasty // Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons. 2016. Vol. 24 (4). P. 220-230. DOI: 10.5435/JAAOS-D-14-00332.
7. Зиновьев М.П., Атманский И.А., Белокобылов А.А., Римашевский Д.В. Предоперационное планирование по телерентгенограммам при тотальном эндопротезировании коленного сустава и его значимость для воссоздания нейтральной оси конечности во фронтальной плоскости // Травматология и ортопедия России. 2019. Т. 25, № 1. С. 32-40. DOI: 10.21823/2311-2905-2019-25-1-32-40.
8. Dao Trong M.L., Diezi C., Goerres G., Helmy N. Improved positioning of the tibial component in unicompartmental knee arthroplasty with patient-specific cutting blocks // Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2015. Vol. 23, № 7. P. 1993-1998. DOI: 10.1007/s00167-014-2839-2.
9. Makhdom A.M., Kerr G.J., Wu E., Lonner J.H. Rotational alignment errors can occur in unicompartmental knee arthroplasty if anatomical landmarks are misused: A preoperative CT scan analysis // Knee. 2020. Vol. 27, № 1. P. 242-248. DOI: 10.1016/j.knee.2019.10.003.
10. Parvizi J., Nunley R.M., Berend K.R., Lombardi A.V. Jr., Ruh E.L., Clohisy J.C., Hamilton W.G., Della Valle C.J., Barrack R.L. High level of residual symptoms in young patients after total knee arthroplasty // Clin Orthop Relat Res. 2014. Vol. 472, № 1. P. 133-137. DOI: 10.1007/s11999-013-3229-7.
11. An V.V., Sivakumar B.S., Phan K., Levy Y.D., Bruce W.J. Accuracy of MRI-based vs. CT-based patient-specific instrumentation in total knee arthroplasty: A meta-analysis // J. Orthop Sci. 2017. Vol. 22, № 1. P. 116-120. DOI: 10.1016/j.jos.2016.10.007.
12. Batailler C., Hannouche D., Benazzo F., Parratte S. Concepts and techniques of a new robotically assisted technique for total knee arthroplasty: the ROSA knee system // Arch. Orthop. Trauma Surg. 2021. Vol. 141 (12). P. 2049-2058. DOI: 10.1007/s00402-021-04048-y.
13. Sharareh B., Schwarzkopf R. Review article: Patient-specific versus standard instrumentation for total knee arthroplasty // J. Orthop. Surg (Hong Kong). 2015. Vol. 23, № 1. P. 100-6. DOI: 10.1177/230949901502300123.
14. Voleti P.B., Hamula M.J., Baldwin K.D., Lee G.C. Current data do not support routine use of patient-specific instrumentation in total knee arthroplasty // J. Arthroplasty. 2014. Vol. 29, № 9. P. 1709-12. DOI:10.1016/j.arth.2014.01.039.
15. Горбатов Р.О., Малышев Е.Е., Романов А.Д., Карякин Н.Н. Тотальное эндопротезирование коленного сустава с использованием виртуального прототипирования и аддитивных технологий // Современные технологии медицины. 2018. Т. 10, № 3. С. 146-148. DOI: 10.17691/stm2018.10.3.18.

16. Баиндурашвили А.Г., Басков В.Е., Филиппова А.В., Бортулев П.И., Барсуков Д.Б., Поздникин И.Ю., Волошин С.Ю., Баскаева Т.В., Познович М.С. Планирование корригирующей остеотомии бедренной кости с использованием 3D-моделирования. Часть I // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2016. Т.4, № 3. С. 55-58. DOI: 10.17816/PTORS4352-58.
17. Mattei L., Pellegrino P., Calò M., Bistolfi A., Castoldi F. Patient specific instrumentation in total knee arthroplasty: a state of the art // Ann. Transl. Med. 2016. Vol. 4, № 7. P. 126. DOI: 10.21037/atm.2016.03.33.