

Применение индивидуального инструментария при хирургическом лечении злокачественных опухолей костей, созданного путем 3D-печати

Д.К. Агаев¹, Е.А. Сушенцов², Д.И. Софронов², А.В. Федорова², Э.Р. Мусаев³, О. Ефименко⁴, М.Д. Алиев⁵, В.А. Хайленко¹

¹ФДПО ФГАОУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова» Минздрава России; Россия, 117997 Москва, ул. Островитянова, 1;

²ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России; Россия, 115478 Москва, Каширское ш., 24;

³ГБУЗ «Московская городская онкологическая больница № 62 Департамента здравоохранения г. Москвы»; Россия, 143423 Московская область, Красногорский район, п/о Степановское, пос. Истра, 27, стр. 1–26;

⁴ООО «ТИОС»; Россия, 119421 Москва, ул. Новаторов, 6;

⁵ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр радиологии» Минздрава России; Россия, 125284 Москва, 2-й Боткинский пр-д, 3

Контакты: Агаев Дергах Камаледдин оглы adergax@mail.ru

Введение. Компьютерное моделирование и аддитивные технологии находят все более широкое применение в медицине. Не является исключением и онкоортопедия. Тщательное предоперационное планирование и создание индивидуального инструментария позволяют выполнять радикальные операции, что дает возможность максимально сохранить здоровые ткани и повышает функциональный потенциал пациентов в послеоперационном периоде.

Цель исследования – улучшить результаты хирургического лечения пациентов со злокачественными новообразованиями костей сложных анатомических локализаций с применением компьютерного моделирования и аддитивных технологий.

Материалы и методы. В исследование были включены 44 пациента (26 мужчин и 18 женщин) со злокачественными новообразованиями костей. Средний возраст больных составил $39 \pm 15,57$ года (от 14 до 66 лет). Индивидуальные навигационные шаблоны были применены при опухолевых поражениях костей таза в 39 случаях, при опухолевых поражениях дистального сегмента бедренной кости – в 4, при опухолевом поражении диафиза бедренной кости – в 1. Наиболее часто встречался такой гистологический тип опухоли, как хондросаркома (47,7 % случаев).

Результаты. По данным гистологического исследования в случае первичного удаления опухоли костей таза (26 пациентов) радикальные границы резекции (R0) наблюдались в 25 случаях. В 1 случае после удаления новообразования выявлено несоответствие предоперационного (хондросаркома G2) и послеоперационного (дедифференцированная хондросаркома G3) гистологических заключений. При операциях по удалению опухолей дистального сегмента бедренной кости и резекции опухоли диафиза бедренной кости во всех случаях радикальность была R0.

Заключение. Индивидуальные навигационные приспособления хорошо зарекомендовали себя в клинической практике. Результаты нашего исследования демонстрируют их эффективность при лечении злокачественных опухолей костей.

Ключевые слова: саркомы, 3D-печать, хирургическое лечение, персонализированное лечение, компьютерное моделирование, аддитивные технологии, индивидуальный инструментарий

Для цитирования: Агаев Д.К., Сушенцов Е.А., Софронов Д.И. и др. Применение индивидуального инструментария при хирургическом лечении злокачественных опухолей костей, созданного путем 3D-печати. Саркомы костей, мягких тканей и опухоли кожи 2022;14(2):11–21. DOI: 10.17650/2782-3687-2022-14-2-11-21.

THE USE OF INDIVIDUAL INSTRUMENTS IN THE SURGICAL TREATMENT OF MALIGNANT BONE TUMORS CREATED BY 3D PRINTING

D.K. Agaev¹, E.A. Sushentsov², D.I. Sofronov², A.V. Fedorova², E.R. Mусаev³, O. Efimenko⁴, M.D. Aliev⁵, V.A. Khailenko¹

¹N.I. Pirogov Russian National Research Medical University, Ministry of Health of Russia; 1 Ostrovityanova St., Moscow 117997, Russia;

²N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Ministry of Health of Russia; 24 Kashirskoe Shosse, Moscow 115478, Russia;

³Moscow City Oncological Hospital No. 62 Moscow Healthcare Department; Bld. 1–26, 27 Istra Village, Krasnogorskiy Dst., Moscow Region 143423, Russia;

⁴ООО «ТИОС»; 6 Novatorov St., Moscow 119421, Russia;

⁵National Medical Radiology Research Center, Ministry of Health of Russia; 3 2nd Botkinsky proezd, Moscow 125284, Russia

Contacts: Dergakh Kamaledin Agaev adergax@mail.ru

Introduction. Computer modeling and additive technologies are increasingly used in medicine. Oncoorthopedics is no exception. Careful preoperative planning and the creation of individual instruments make it possible to perform radical operations, which allows maximum preservation of healthy tissues and leads to an increase in the functional potential of patients in the postoperative period.

Objective – to improve the results of surgical treatment of patients with malignant bone tumors of complex anatomical localizations using computer modeling and additive technologies.

Materials and methods. This study included 44 patients (26 men and 18 women) with malignant bone tumors. The mean age of the patients was 39 ± 15.57 years (range 14 to 66 years). In 39 cases, the anatomical location of PSI application was the pelvis, in four cases it was the distal femur, and in one case the femoral shaft. The most common histological type of tumor was chondrosarcoma (47.7 %).

Results. In the case of primary resection of the pelvic bone tumor (26 patients), according to the histological examination, radical resection margins (R0) were observed in 25 cases. In one case, after removal of the tumor, a discrepancy between the preoperative histological conclusion (G2 chondrosarcoma) and postoperative (dedifferentiated G3 chondrosarcoma) was revealed. During operations to remove tumors of the distal segment of the femur and resection of the tumor of the diaphysis of the femur, in all cases, the radicality was R0.

Conclusion. Individual navigation devices have proven themselves in clinical practice. The results obtained in our study demonstrate their effectiveness in the treatment of malignant bone tumors.

Key words: sarcomas, 3D printing, surgical treatment, personalized treatment, computer modeling, additive technologies, individual tools

For citation: Agaev D.K., Sushentsov E.A., Sofronov D.I. et al. The use of individual instruments in the surgical treatment of malignant bone tumors created by 3D printing. *Sarkomy kostej, myagkikh tkanej i opukholi kozhi = Bone and soft tissue sarcomas, tumors of the skin* 2022;14(2):11–21. (In Russ.). DOI: 10.17650/2782-3687-2022-14-2-11-21.

Введение

Первичные опухоли костей относятся к редкой группе заболеваний и составляют небольшой процент от общего количества злокачественных новообразований. Со времен создания онкологической ортопедии (с 60-х годов XX в.) лечение первичных и вторичных поражений костей скелета претерпело много изменений. Была усовершенствована хирургическая техника, внедрены новейшие протоколы химиотерапевтического и лучевого лечения, стали использоваться современное анестезиологическое и реанимационное пособия [1]. Современными инновационными подходами являются также компьютерное моделирование, 3D-визуализация, аддитивные технологии, которые все чаще находят применение в клинической практике. Их использование направлено не только на увеличение продолжительности жизни пациентов с первичными опухолями костей, но и на улучшение функциональных результатов лечения. При операбельных случаях в ортопедической онкологии по сей день выполняют радикальные операции. Нерадикальные хирургические вмешательства при злокачественных поражениях костей приводят к возникновению локального рецидива и значительно снижают продолжительность жизни [2–4].

Радикальные операции при опухолевом поражении костей сложных анатомических локализаций, особенно костей таза, являются непростой задачей [5]. С недавнего времени инновационным решением и вспомогательным инструментом для радикальных хирургических

вмешательств стало использование компьютерной навигационной системы. Данная методика позволяет точно смоделировать область оперативного вмешательства, определить края резекции (согласно принципам радикальности) и точно установить металлоконструкцию для восстановления целостности тазового кольца. Это обеспечивает лучшие функциональные результаты и снижает количество осложнений, связанных с механической нестабильностью имплантата [6–8].

Несмотря на все преимущества у данной методики есть ряд недостатков. Во-первых, необходимо наличие в стационаре и непосредственно в самой операционной дорогостоящего компьютерного оборудования. Во-вторых, хирурги должны обладать определенными навыками в сфере компьютерных технологий, чтобы выполнить предоперационное планирование и использовать интраоперационную компьютерную навигацию. Бурное развитие в последние десятилетия аддитивных технологий и их применение в сфере медицины позволили решить ряд проблем. Во время оперативного вмешательства для более точного выполнения определенного этапа операции используют индивидуальные навигационные системы (Patient specific instruments, PSI) – индивидуальные приспособления, которые создаются на основе данных компьютерного моделирования путем 3D-печати. При онкоортопедических операциях применяют такие PSI, как индивидуальные шаблоны или гайды, направленные на выполнение радикальных резекций опухолей костей.

Представляем опыт применения персонализированных навигационных систем, которые были использованы нами в период с 2018 по 2021 г.

Материалы и методы

В исследование были включены 44 пациента (26 мужчин и 18 женщин), которым в период с 2018 по 2021 г. выполнены хирургические вмешательства различного объема по поводу злокачественных образований костей скелета с применением индивидуальных навигационных систем. Средний возраст пациентов составил $39 \pm 15,57$ года (от 14 до 66 лет), средний период наблюдения – 14 ± 13 мес (от 1 до 51 мес). Наиболее часто встречались такие гистологические типы опухолевого поражения, как хондросаркома (47,7 % случаев) и остеосаркома (15,9 % случаев) (табл. 1). В 39 (88,7 %) случаях PSI применялись в костях таза, в 4 (9,1 %) – в дистальном отделе бедренной кости, в 1 (2,2 %) – в диафизе бедренной кости.

Пациенты были разделены на группы в зависимости от объема резекций костей таза в соответствии

Таблица 1. Характеристика пациентов

Table 1. Characteristics of patients

Параметр Parameter	Число пациентов, абс. (%) Number of patients, abs. (%)
Пол: Gender:	
мужской male	26 (59,1)
женский female	18 (40,9)
Гистологический тип опухоли: Histological type of tumor:	
хондросаркома chondrosarcoma	21 (47,7)
остеосаркома osteosarcoma	7 (15,9)
паростальная остеосаркома перевод саркома Юинга sarcoma Ewing's	4 (9,1)
метастаз рака почки sarcoma kidney cancer metastasis	2 (4,5)
гигантоклеточная опухоль gigant cell tumor	2 (4,5)
десмопластическая фиброма desmoplastic fibroma	1 (2,3)
фиброзная дисплазия fibrous dysplasia	1 (2,3)
недифференцированная плеоморфная саркома undifferentiated pleomorphic sarcoma	1 (2,3)
солитарная фиброзная опухоль мягких тканей solitary fibrous soft tissue tumor	1 (2,3)

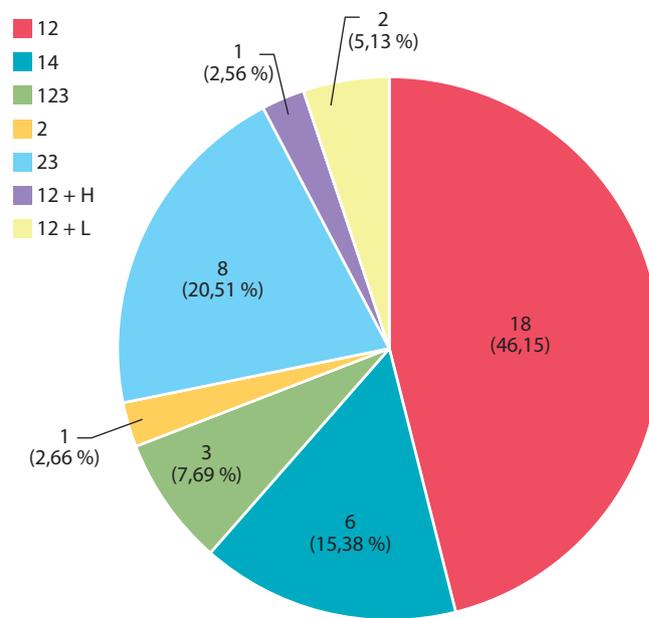


Рис. 1. Распределение пациентов в зависимости от объема резекции костей таза в соответствии с хирургической классификацией Musculoskeletal Tumour Score (W.F. Enneking)

Fig. 1. Distribution of patients depending on the volume of pelvic bone resection according to the surgical classification Musculoskeletal Tumour Score (W.F. Enneking)

с хирургической шкалой MSTS (Musculoskeletal Tumour Score) (W.F. Enneking) (рис. 1). Двадцати шести (66,7 %) больным проведены первичные операции – удаление опухолей костей таза с одномоментной реконструкцией. Тринадцати (33,3 %) пациентам с благоприятным онкологическим прогнозом, которые ранее перенесли операции в объеме резекции костей таза с целью удаления опухоли, был выполнен 2-й этап хирургического вмешательства. В данных случаях навигационные шаблоны применяли для формирования опилов костей таза, к которым в последующем прикрепляли имплантат. Помимо навигационных систем в качестве направляющих для выполнения резекций и формирования опилов при хирургических вмешательствах на костях таза в 18 случаях (как при первичных, так и при вторичных операциях) применяли шаблоны для рассверливания отверстий под фиксирующие винты.

Краевая резекция дистального сегмента бедренной кости с применением PSI выполнялась 3 пациентам с высокодифференцированной паростальной остеосаркомой (рис. 2) и 1 больной с гигантоклеточной опухолью с благоприятным прогнозом после лечения деносуабом.

В рамках данного исследования были разработаны основные варианты индивидуальных шаблонов для выполнения радикальных резекций опухолей костей сложных анатомических локализаций и формирования

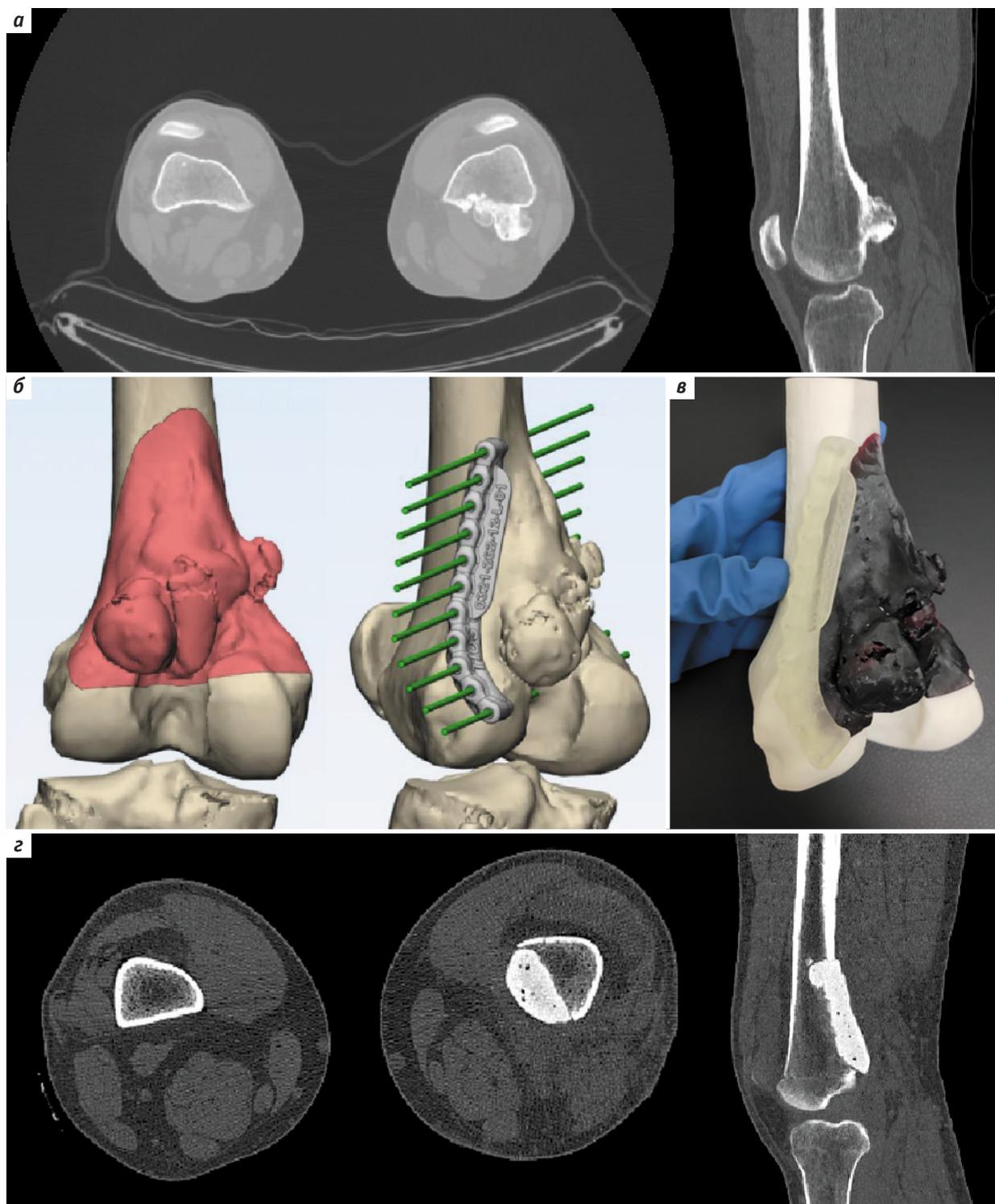


Рис. 2. Использование навигационного шаблона для краевой резекции опухоли дистального сегмента бедренной кости: а – вид опухолевого поражения по данным компьютерной томографии; б – предоперационное планирование при помощи компьютерного моделирования. Определение радикальных границ резекций и оптимального дизайна навигационного шаблона; в – анатомическая модель опухолевого поражения дистального сегмента бедренной кости с индивидуальным резекционным шаблоном и указанием места его приложения; г – контрольная компьютерная томография после выполненного объема хирургического вмешательства

Fig. 2. Use of a navigation device for marginal resection of a distal femoral tumor: a – tumor lesion according to computed tomography scan; б – preoperative planning by computer modelling. Determining the radical margins of resections, the optimal design of the navigation device; в – anatomical model of a tumor resection of the distal femur segment with an individual resection device and its application site; г – control computed tomography after the performed surgery

отверстий по заданной траектории для фиксирующих элементов имплантатов.

На предоперационном этапе все пациенты, участвующие в исследовании, прошли стандартные исследования, включающие компьютерную (КТ) и магнитно-резонансную томографию с целью детального изучения зоны интереса. Для построения последующих реконструкций, компьютерного моделирования и создания моделей в STL-формате (stereolithography, стереолитография) выполняли КТ в специальном режиме. На следующем этапе совместно с биоинженерами определялись радикальные границы резекции и дизайн индивидуального резекционного шаблона, его форма и место приложения к скелетизированной кости. При использовании шаблонов для установки фиксирующих элементов имплантатов или эндопротезов совместно с биоинженерами устанавливались зона приложения шаблона, его форма, диаметр предполагаемого отверстия и направление, которое этот шаблон создает для сверла. Затем выполнялась печать индивидуальных шаблонов при помощи 3D-принтеров.

В настоящее время наиболее распространенным и доступным методом 3D-печати является моделирование с помощью послойного наплавления (fused deposition modeling, FDM). Это наиболее экономичный и быстрый способ производства нестандартных термопластичных деталей и прототипов различных изделий. На сегодняшний день представлен широкий ассортимент доступных с финансовой точки зрения расходных материалов для FDM-печати.

Данный вид 3D-печати использовался в нашем исследовании только для производства предоперационных макетов, поскольку расходный материал для печати не выдерживает общепринятых методов предоперационной стерилизации. В начале эксперимента в качестве технологии 3D-печати применялся метод лазерной стереолитографии (stereolithography apparatus, SLA). Главной отличительной чертой данного вида аддитивного производства является достижение конечного результата с использованием полимеризации смолы. В качестве расходного материала применялись фотополимеры.

К безусловным преимуществам SLA-технологии относится возможность производства деталей с очень высокой точностью. Данные изделия отличаются хорошей детализацией и идеальной гладкой поверхностью. Главным недостатком шаблонов, созданных при помощи этой технологии печати, является их хрупкость. Согласно данным нашего исследования наиболее оптимальной оказалась 3D-печать шаблонов методом селективного спекания порошка (selective laser sintering, SLS). Она заключается в послойном спекании частиц порошкообразного материала до образования полноценного объекта по заданной модели. Процесс спекания происходит под воздействием луча лазера, а построение модели выполняется слой за слоем,

снизу вверх. Преимущество этого метода заключается в том, что печатные опоры (поддержка модели) не нужны, поскольку окружающий неспеченный материал действует как опора во время всего процесса печати. В качестве расходного материала использовался полимерный порошок – полиамид. Изделия, напечатанные из него, легко поддаются воздействию во время постобработки и безопасны при интраоперационном применении.

После выполнения доступа к предполагаемой линии резекции (по данным предоперационного планирования), полных мобилизации опухолевого узла и скелетизации кости устанавливается индивидуальный навигационный шаблон. Индивидуальные шаблоны для выполнения резекции снабжены 2-миллиметровыми отверстиями. Их количество может варьировать в зависимости от размера шаблона, который должен плотно прилегать к скелетизированной поверхности кости, поскольку он создается в соответствии с индивидуальными анатомическими данными пациента. При необходимости выполняется дополнительная скелетизация поверхности кости, однако она не должна нарушать основных принципов радикальности. После установки навигационного шаблона на линию предполагаемой резекции через отверстия проводятся спицы, определяющие плоскость резекции. Шаблоны удаляются из операционного поля. Спицы остаются введенными в кость по линии предполагаемой резекции. При помощи осцилляторной пилы выполняется резекция кости по установленным спицам, чтобы не ошибиться в плоскости резекции. Это имеет принципиальное значение при резекциях опухолей костей таза и планировании установки индивидуального имплантата. Именно при резекции под контролем резекционного шаблона формируется место для интеграции эндопротеза. Этапы создания индивидуального навигационного шаблона, а также его практическое применение представлены на рис. 3.

Как уже было сказано выше, у 18 пациентов при оперативных вмешательствах по поводу злокачественных новообразований костей таза (как при первичных, так и при вторичных операциях) применялись шаблоны для рассверливания отверстий под фиксирующие элементы (рис. 4). Шаблоны в данном случае фиксируются 2–3 спицами для плотного прилегания к опилу кости и снижения риска их смещения. Затем в зависимости от диаметра предполагаемого фиксирующего элемента (который также определяется на предоперационном этапе) с помощью соответствующего сверла выполняется отверстие по определенной траектории. Данная методика позволяет значительно снизить время продолжительности операции, поскольку отсутствует необходимость в установке фиксирующих элементов под контролем электронно-оптического преобразователя.

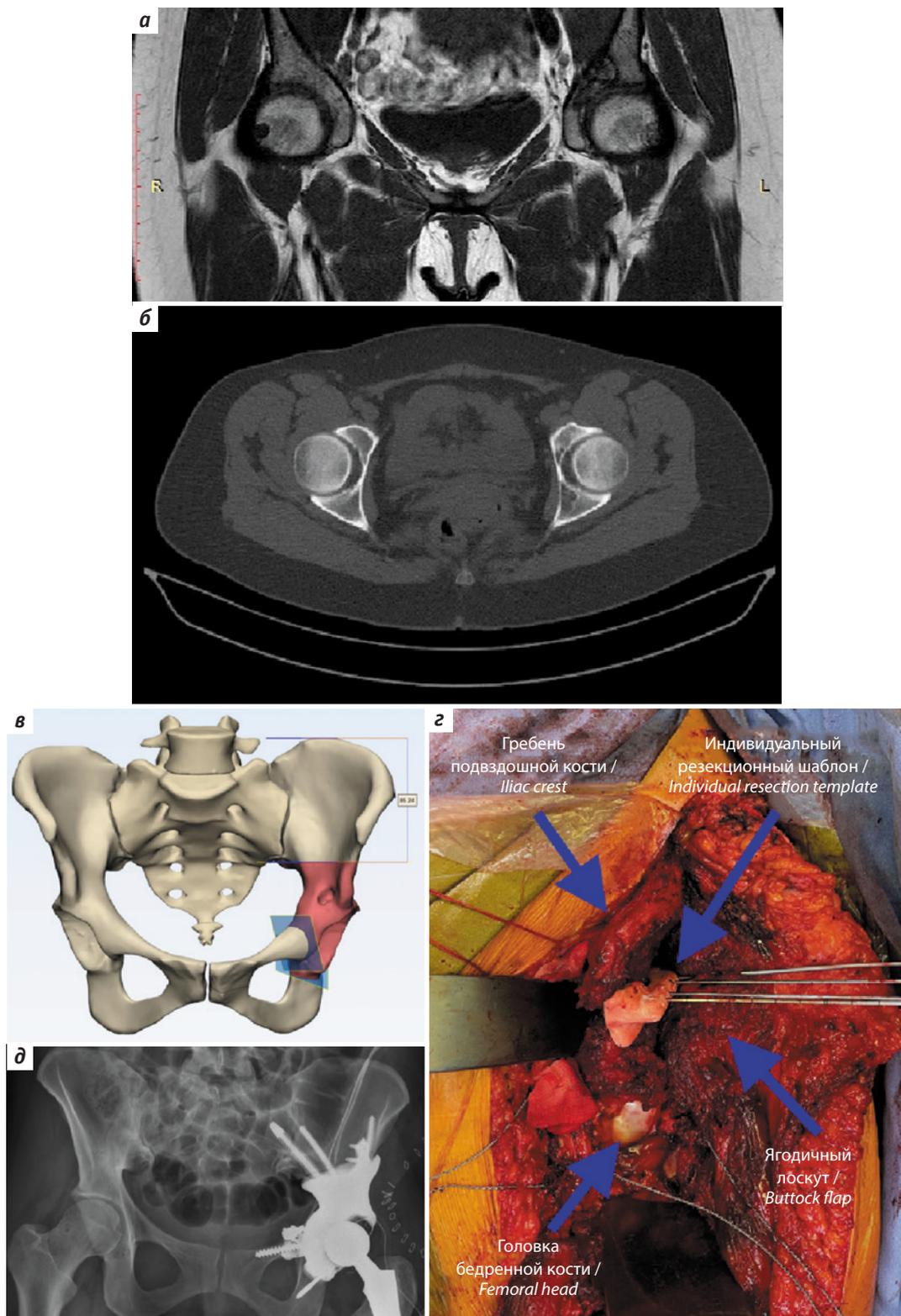


Рис. 3. Этапы создания и практического применения индивидуального резекционного шаблона: а – данные рентгенологических методов исследований; б – определение радикальных границ резекций и формирование оптимального дизайна резекционного шаблона при помощи компьютерного моделирования совместно с биоинженерами; в – интраоперационное применение индивидуального резекционного шаблона; г – рентгенологический контроль после выполненного хирургического вмешательства

Fig. 3. Stages of creation and practical application of an individual resection template: а – data from X-ray methods of research; б – determination of the radical margins of resections and the formation of the optimal design of the resection template using computer modelling in conjunction with bioengineers; в – intraoperative application of a customized resection template; г – X-ray control after the performed surgery

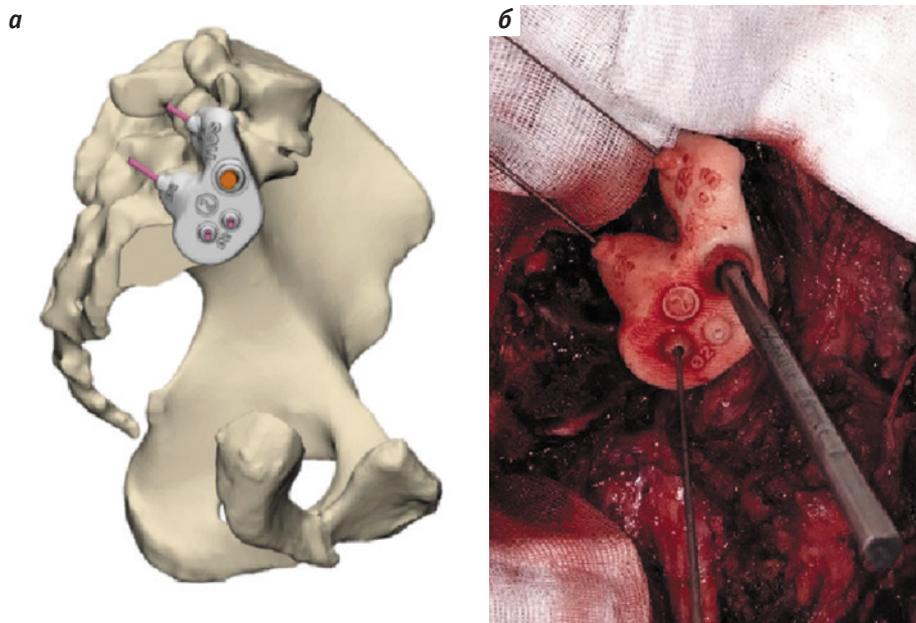


Рис. 4. Использование навигационного шаблона для рассверливания отверстия под фиксирующий винт: а – применение шаблона для определения точки и траектории рассверливания; б – установка шаблона интраоперационно

Fig. 4. Using the navigation template to drill a hole for the fixing screw: a – using a template to define the reaming point and path; б – installation of the template intraoperatively

Результаты

По данным гистологического исследования у 25 из 26 пациентов с опухолевым поражением костей таза, которым было выполнено одномоментное удаление опухоли с реконструкцией тазового кольца и применением индивидуальных навигационных систем, радикальность была R0. При нерадикальном хирургическом вмешательстве на предоперационном этапе по результатам выполненной биопсии выявлена классическая хондросаркома G2. Однако согласно данным патоморфологического исследования удаленного макропрепарата установлен диагноз «недифференцированная хондросаркома G3». В данном случае у пациентки в раннем послеоперационном периоде развился локальный рецидив. Еще 2 локальных рецидива были выявлены у больных с диагнозом «остеосаркома». В одном случае рецидив возник в раннем послеоперационном периоде одновременно с бурным прогрессированием основного заболевания и появлением множественных очагов в других костях. В другом случае рецидив развился спустя 6 мес после операции.

При удалении опухолей дистального сегмента бедренной кости и резекции опухоли диафиза бедренной кости во всех случаях радикальность была R0. При краевой резекции дистального отдела бедренной кости по поводу опухолевого поражения данная методика выбрана в качестве суставосберегающей операции при благоприятном онкологическом прогнозе. Ее альтернативой являлась резекция пораженного отдела

бедренной кости с эндопротезированием коленного сустава. В 1 случае после краевой резекции опухоли дистального сегмента правой бедренной кости по поводу паростальной остеосаркомы (G1) по данным контрольных обследований через 15 мес после операции был выявлен локальный рецидив. В данном случае операция с применением индивидуального резекционного шаблона в нашем учреждении выполнялась также по поводу рецидивного опухолевого образования. После 2 рецидивов пациентке проведено хирургическое вмешательство в объеме сегментарной резекции дистального отдела правой бедренной кости с эндопротезированием коленного сустава. Результаты хирургического вмешательства с применением индивидуальных резекционных шаблонов представлены в табл. 2.

В нашем исследовании в среднем на разработку и производство индивидуальных шаблонов с учетом предоперационного планирования, определения оптимального дизайна шаблона, самого процесса печати, а также постобработки изделий ушло от 2 до 5 дней.

Однолетняя безрецидивная выживаемость пациентов, которым выполняли резекцию опухолей костей с применением индивидуальных резекционных шаблонов, составила 87 %, 2- и 3-летняя безрецидивная выживаемость – 87 и 71 % соответственно. Также были построены кривые Каплана–Мейера, показывающие значения общей безрецидивной выживаемости и ее зависимость от степени злокачественности опухоли у больных с первичными опухолями костей (рис. 5, 6).

Таблица 2. Результаты хирургического вмешательства с применением индивидуальных резекционных шаблонов у пациентов со злокачественными опухолями костей (n = 26)

Table 2. Results of operations using patient specific instruments in patients with malignant bone tumors (n = 26)

Показатель Parameter	Локализация опухоли Localization of the tumor			Всего Total
	Таз Перевод	Дистальный сегмент бедренной кости Distal segment of the femur	Диафиз бедренной кости Diaphysis of the femur	
Положительный край резекции (R1), абс. (%) Positive resection margin (R1), abs. (%)	1 (3,8)	0 (0)	0 (0)	1 (3,2)
Локальный рецидив, абс. (%) Local relapse, abs. (%)	3 (11,5)	1 (25,0)	0 (0)	4 (12,9)

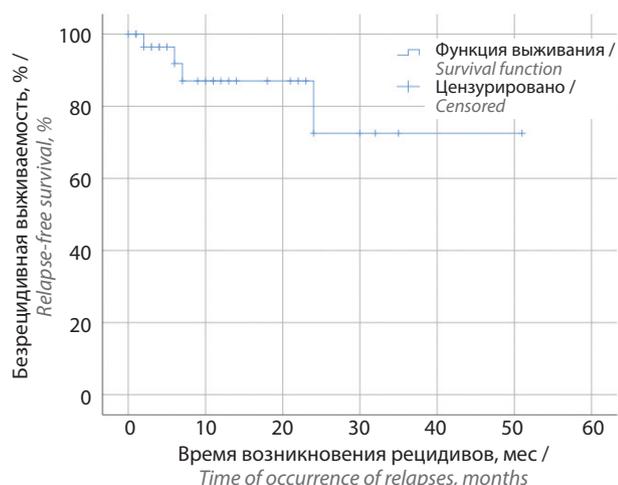
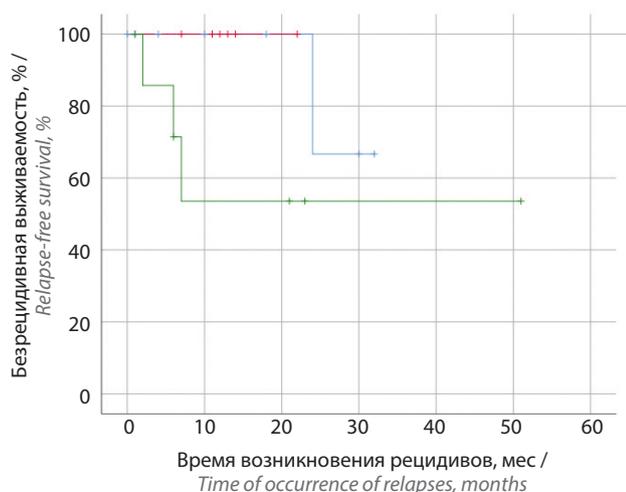


Рис. 5. Общая безрецидивная выживаемость
Fig. 5. Overall relapse-free survival



Степень злокачественности / Grade of malignancy
 1 — 1 – цenzурировано / 1 – censored
 2 — 2 – цenzурировано / 2 – censored
 3 — 3 – цenzурировано / 3 – censored

Рис. 6. Зависимость общей безрецидивной выживаемости от степени злокачественности опухоли
Fig. 6. Dependence of overall relapse-free survival on the degree of malignancy of the tumor

Обсуждение

Тщательное предоперационное планирование имеет принципиальное значение в онкоортопедии. «Золотым правилом» при выполнении резекций опухолей костей является соблюдение правил радикальности и абластики. Это позволяет значительно снизить вероятность развития местного рецидива и положительно влияет на общую продолжительность жизни пациентов. Однако погоня за максимально радикальными границами резекции при выполнении органосохраняющих операций зачастую может привести к удалению большого количества здоровых тканей и мышц, что осложняет выполнение реконструкции оперированной зоны и снижает функциональный статус пациентов в послеоперационном периоде. Стремительное развитие компьютерных методов моделирования и визуализации способствует решению данной проблемы [9].

При злокачественных поражениях костей скелета, особенно костей таза, уже давно в клинической практике широко применяются радикальные органосохраняющие операции под контролем компьютерной навигации. Опубликовано много статей на эту тему [10–15]. Относительно более новым методом выполнения радикальных органосохраняющих операций при злокачественных поражениях костей скелета является применение индивидуальных шаблонов, созданных с помощью 3D-печати. Е.А. Сушенцов и соавт. продемонстрировали опыт применения навигационных шаблонов при хирургическом лечении 20 пациентов со злокачественными опухолями костей таза. Наряду с применением PSI большим выполнялось замещение дефекта костей таза индивидуальными титановыми имплантатами [16]. F. Gouin и соавт. выполнили удаление опухолей костей таза у 11 пациентов с применением PSI. После операций были проведены гистологическое исследование удаленного макропрепарата и сравнение результатов послеоперационного и предоперационного КТ-исследований для определения точности операции. Во всех случаях края

резекции были R0. Сравнение данных рентгенологического исследования показало, что точность выполнения резекции в среднем составила 2,5 мм [17].

Еще одним методом оценки радикальности и точности выполнения запланированной резекции при помощи индивидуального инструментария поделились J.W. Park и соавт. из Южной Кореи. Авторы ретроспективно оценили результаты 12 выполненных хирургических вмешательств. Они сравнили запланированные и фактические границы резекций при помощи анализа гистологического исследования удаленного макропрепарата. Точность резекции составила от 0 до 3 мм [18]. Одна из последних статей, посвященная применению индивидуального инструментария, опубликована коллективом авторов из Швейцарии. Были проанализированы данные 11 пациентов, которым выполняли резекции опухолей костей различной анатомической локализации (таз, лопатка, дистальный сегмент бедренной кости, проксимальный сегмент большеберцовой кости) с использованием индивидуальных шаблонов. После хирургического вмешательства проведены исследование удаленного макропрепарата, его сегментация и импортирование в исходную модель планирования, что позволило в последующем оценить разницу между запланированной и выполненной резекцией. Отклонения вычислялись во всех плоскостях. Для определения точности резекции были суммированы абсолютные значения погрешностей в резекциях во всех плоскостях и вычислено их среднее значение. Средний период наблюдения составил 17 мес. За этот период ни 1 случая местного рецидива обнаружено не было. В целом среднее значение ошибки при резекции независимо от плоскости варьировало от $0,74 \pm 0,96$ мм до $3,60 \pm 2,46$ мм. Авторы пришли к выводу, что значение ошибочных резекций при использовании индивидуальных шаблонов крайне невелико, что позволяет более активно применять их при выполнении сложных резекций опухолей костей [19].

Выбор метода — компьютерной навигации или индивидуальных шаблонов, напечатанных с помощью 3D-принтера, — остается за хирургом. Безусловно,

необходимо учитывать технические факторы и вопросы оснащения. Однако это вполне взаимозаменяемые и взаимодополняемые методики. У каждой из них есть как плюсы, так и минусы. Главными недостатками интраоперационной навигационной системы является необходимость дорогостоящей системы, а также наличие у хирурга определенных навыков для работы с ней. Применение индивидуальных шаблонов требует значительных временных затрат на предоперационном этапе для планирования и производства индивидуального инструментария, что может способствовать (хотя и незначительному) изменению границ радикальной резекции. Однако использование шаблонов позволяет значительно уменьшить продолжительность операции. Также применение PSI требует полной скелетизации поверхности кости, к которой планируется приложить шаблон. Что касается точности резекций, результаты использования каждой из них не имеют существенных различий [20].

Заключение

Индивидуальные шаблоны, напечатанные на 3D-принтере, хорошо зарекомендовали себя в органосохраняющей хирургии злокачественных опухолей костей, особенно когда речь идет о поражении таких сложных анатомических локализаций, как кости таза. Они требуют определенного времени на предоперационном этапе для планирования и производства индивидуального инструментария. Несомненным же преимуществом PSI является возможность точного выполнения радикальных резекций при опухолевом поражении костей и определения направления отверстий под фиксирующие элементы устанавливаемой конструкции. Все это позволяет выполнять радикальные резекции с максимальным сохранением здоровых тканей. Использование шаблонов в качестве направителей обеспечивает сокращение интраоперационного времени и исключение лучевого воздействия на операционную бригаду, которое происходит при установке фиксирующих элементов под контролем электронно-оптического преобразователя.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Алиев М.Д., Сушенцов Е.А. Современная онкоортопедия. Саркомы костей, мягких тканей и опухоли кожи 2012;4: 3–10. [Aliyev M.D., Sushentsov E.A. Modern oncoortopedia. Sarkomy kostej, myagkikh tkanej i opukholi kozhi = Bone and soft tissue sarcomas, tumors of the skin 2012;4:3–10. (In Russ.)].
2. Fuchs B., Hoekzema N., Larson D.R. et al. Osteosarcoma of the pelvis: outcome analysis of surgical treatment. *Clinical orthopaedics and related research* 2009;467(2):510–8. DOI: 10.1007/s11999-008-0495-x.
3. Bertrand T.E., Cruz A., Binitie O. et al. Do surgical margins affect local recurrence and survival in extremity, nonmetastatic, high-grade osteosarcoma? *Clin Orthop Relat Res* 2016;474(3):677–83. DOI: 10.1007/s11999-015-4359-x.
4. He F., Zhang W., Shen Y. et al. Effects of resection margins on local recurrence of osteosarcoma in extremity and pelvis: systematic review and meta-analysis *Int J Surg* 2016;36(Pt. A):283–92. DOI: 10.1016/j.ijsu.2016.11.016.
5. Cartiaux O., Docquier P.-L., Paul L. et al. Surgical inaccuracy of tumor resection and reconstruction within the pelvis: an experimental study. *Acta Orthopaed* 2008;79(5):695–702. DOI: 10.1080/17453670810016731.
6. Мусаев Э.Р., Щипахин С.А., Сушенцов Е.А. и др. Первый опыт

- применения навигационной системы в хирургическом лечении опухолей костей таза. Саркомы костей, мягких тканей и опухоли кожи 2011;3:10–5. [Musaev E.R., Shcherpikhin S.A., Sushentsov E.A. et al. The first experience of using a navigation system in the surgical treatment of pelvic bone tumors. Sarkomy kostej, myagkikh tkanej i opukholi kozhi = Bone and soft tissue sarcomas, tumors of the skin 2011;3:10–5. (In Russ.)].
7. Wong K.C., Niu X., Xu H. et al. Computer navigation in orthopaedic tumour surgery. *Adv Exp Med Biol* 2018;1093:315–26. DOI: 10.1007/978-981-13-1396-7_24.
 8. Софронов Д.И., Мусаев Э.Р., Сушенцов Е.А. и др. Новый метод реконструкции и 3D-технологии в лечении больных с опухолями крестцово-подвздошного сочленения. Саркомы костей, мягких тканей и опухоли кожи 2016;2:3–10. [Sofronov D.I., Musaev E.R., Sushentsov E.A. et al. New method of reconstruction and 3D-technologies in the treatment of patients with tumors of the sacroiliac joint. Sarkomy kostej, myagkikh tkanej i opukholi kozhi = Bone and soft tissue sarcomas, tumors of the skin 2016;(2):3–10. (In Russ.)].
 9. Агаев Д.К., Сушенцов Е.А., Софронов Д.И. и др. Применение компьютерного моделирования и 3D-технологий в онкоортопедии. Обзор литературы. Саркомы костей, мягких тканей и опухоли кожи 2019;11(4):5–16. [Agaev D.K., Sushentsov E.A., Sofronov D.I. et al. The use of computer modeling and 3D-technologies in oncoorthopedia. Literature review. Sarkomy kostej, myagkikh tkanej i opukholi kozhi = Bone and soft tissue sarcomas, tumors of the skin 2019;11(4):5–16. (In Russ.)].
 10. Krettek C., Geerling J., Bastian L. et al. Computer aided tumor resection in the pelvis. *Injury* 2004;35(Suppl. 1):S-A79–83.
 11. Cheong D., Letson G.D. Computer-assisted navigation and musculoskeletal sarcoma surgery. *Cancer Control* 2011;18(3):171–6. DOI: 10.1177/107327481101800304.
 12. So T.Y.C., Lam Y.L., Mak K.L. Computer-assisted navigation in bone tumor surgery: seamless workflow model and evolution of technique. *Clin Orthop Relat Res* 2010;468(11):2985–91. DOI: 10.1007/s11999-010-1465-7.
 13. Wu K., Webber N.P., Ward R.A. et al. Intraoperative navigation for minimally invasive resection of periarticular and pelvic tumors. *Orthopedics* 2011;34(5):370–6. DOI: 10.3928/01477447-20110317-17.
 14. Docquier P.L., Paul L., Cartiaux O. et al. Computer-assisted resection and reconstruction of pelvic tumor sarcoma. *Sarcoma* 2010;2010:125162. DOI: 10.1155/2010/125162.
 15. Fehlberg S. et al. Computer-assisted pelvic tumor resection: fields of application, limits, and perspectives. *Recent Results Cancer Res* 2009;179:169–82. DOI: 10.1007/978-3-540-77960-5_11.
 16. Сушенцов Е.А., Мусаев Э.Р., Софронов Д.И. и др. Замещение дефектов костей таза у онкологических больных индивидуальными имплантатами. Опыт лечения 20 пациентов. Саркомы костей, мягких тканей и опухоли кожи 2020;12(1):5–13. [Sushentsov E.A., Musaev E.R., Sofronov D.I. et al. Surgical treatment of pelvic bone tumors using personalized implants. Experience in 20 patients. Sarkomy kostej, myagkikh tkanej i opukholi kozhi = Bone and soft tissue sarcomas, tumors of the skin 2020;12(1):5–13. (In Russ.)].
 17. Gouin F., Paul L., Odri G.A., Cartiaux O. Computer-assisted planning and patient-specific instruments for bone tumor resection within the pelvis: a series of 11 patients. *Sarcoma* 2014;2014:842709. DOI: 10.1155/2014/842709.
 18. Park J.W., Kang H.G., Lim K.M. et al. Bone tumor resection guide using three-dimensional printing for limb salvage surgery. *J Surg Oncol* 2018;118(6):898–905. DOI: 10.1002/jso.25236.
 19. Müller D.A., Stutz Y., Vlachopoulos L. et al. The accuracy of three-dimensional planned bone tumor resection using patient-specific instrument. *Cancer Management Res* 2020;12:6533–40. DOI: 10.2147/CMAR.S228038.
 20. McCulloch R.A., Frisoni T., Kurunskal V. et al. Computer navigation and 3D printing in the surgical management of bone sarcoma. *Cells* 2021;10(2):195. DOI: 10.3390/cells10020195.

Вклад авторов

Д.К. Агаев: проведение операций, разработка концепции и дизайна статьи, написание текста статьи;
 Е.А. Сушенцов: проведение операций, разработка концепции и дизайна статьи, научное редактирование;
 Д.И. Софронов: проведение операций, обзор публикаций по теме статьи;
 А.В. Федорова, О. Ефименко: написание текста статьи, сбор и обработка материала;
 Э.Р. Мусаев, М.Д. Алиев: проведение операций, научное редактирование;
 В.А. Хайленко: научное редактирование.

Authors' contributions

D.K. Agaev: performing operations, research concept and design, article writing;
 E.A. Sushentsov: performing operations; research concept and design, scientific editing of the article;
 D.I. Sofronov: performing operations, reviewing of publications of the article's theme;
 A.V. Fedorova, O. Efimenko: article writing, material collection and processing;
 E.R. Musaev, M.D. Aliev: performing operations, scientific editing of the article;
 V.A. Khailenko: scientific editing of the article.

ORCID авторов / ORCID of authors

Д.К. Агаев / D.K. Agaev: <https://orcid.org/0000-0002-6239-8152>
 Е.А. Сушенцов / E.A. Sushentsov: <https://orcid.org/0000-0003-3672-1742>
 Д.И. Софронов / D.I. Sofronov: <https://orcid.org/0000-0001-9557-3685>
 А.В. Федорова / A.V. Fedorova: <https://orcid.org/0000-0002-4516-3255>
 О. Ефименко / O. Efimenko: <https://orcid.org/0000-0003-3635-4380>
 Э.Р. Мусаев / E.R. Musaev: <https://orcid.org/0000-0002-1241-3019>
 М.Д. Алиев / M.D. Aliev: <https://orcid.org/0000-0003-2706-4138>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.
Financing. The study was performed without external funding.

Соблюдение прав пациентов и правил биоэтики

Протокол исследования одобрен комитетом по биомедицинской этике ФДПО ФГАОУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова» Минздрава России.

Пациенты подписали информированное согласие на публикацию своих данных.

Compliance with patient rights and principles of bioethics

The study protocol was approved by the biomedical ethics committee of N.I. Pirogov Russian National Research Medical University, Ministry of Health of Russia.

The patients gave written informed consent to the publication of their data.

Статья поступила: 15.03.2022. **Принята к публикации:** 11.04.2022.

Article submitted: 15.03.2022. **Accepted for publication:** 11.04.2022.