

РЕЗЕКЦИЯ ОПУХОЛЕЙ КОСТЕЙ ЧЕРЕПА С ОДНОМОМЕНТНОЙ ПЛАСТИКОЙ ДЕФЕКТА ПЕРСОНИФИЦИРОВАННЫМ ИМПЛАНТОМ

К.С. Яшин¹, Р.Д. Зинатуллин¹, И.С. Братцев¹, Д.В. Дубровский¹, А.Ю. Ермолаев², М.В. Остапук¹,
М.А. Кутлаева¹, М.В. Растеряева¹, И.А. Медяник¹, Л.Я. Кравец¹

¹ФГБОУ ВО «Приволжский исследовательский медицинский университет» Минздрава России; Россия, 603005 Нижний Новгород, пл. Минина и Пожарского, 10/1;

²ГБУЗ МО «Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М.Ф. Владимирского»; Россия, 129110 Москва, ул. Щепкина, 61/2

Контакты: Константин Сергеевич Яшин yashinmed@yandex.ru

Введение. Для пациентов с опухолями костей черепа было показано, что не только онкологический, но и косметический результат лечения оказывает существенное влияние на отдаленные исходы лечения. Традиционным подходом к хирургическому лечению опухолевых поражений костей черепа является удаление опухоли с одномоментной пластикой образовавшегося дефекта черепа с интраоперационным моделированием аутогенными костными трансплантатами, титаном или другими синтетическими материалами. В последнее время все больше внимания получает технология одномоментного выполнения резекции костной опухоли и пластики дефекта черепа с помощью индивидуального импланта на основе виртуального планирования границ резекции.

Цель исследования – сравнить результаты хирургического лечения пациентов с опухолями костей черепа с применением традиционного подхода (интраоперационное формирование пластины для закрытия дефекта) и одномоментной резекции с последующей пластикой дефекта персонифицированным имплантом, изготовленным с помощью предоперационного виртуального моделирования.

Материалы и методы. В исследование включены 24 пациента с новообразованиями костей черепа или оболочек головного мозга с экстракраниальным ростом. В зависимости от методики проведения оперативного вмешательства пациенты были разделены на 2 группы: 1-я группа ($n = 13$) – применение предоперационного планирования области костной резекции и изготовление индивидуального импланта для замещения костного дефекта; 2-я группа ($n = 11$) – оперативное вмешательство с применением традиционного подхода – с интраоперационным формированием пластины для закрытия дефекта черепа.

Результаты. Группы статистически значимо не различались по полу, возрасту, продолжительности оперативного вмешательства, объему кровопотери, времени пребывания в стационаре. Применение предоперационного виртуального моделирования не продемонстрировало статистически значимого лучшего результата в аспекте сохранения симметрии черепа по сравнению с традиционным подходом. У всех пациентов отмечен хороший косметический результат, осложнений не было.

Выводы. Технология одномоментного выполнения резекции костной опухоли и пластики дефекта черепа с помощью индивидуального импланта на основе виртуального планирования границ резекции является эффективным методом лечения пациентов с новообразованиями костей черепа. Несмотря на отсутствие статистически значимых различий в результатах лечения опухолей костей черепа между данным методом и традиционным подходом с интраоперационным моделированием пластины, виртуальное моделирование операции с изготовлением индивидуального импланта выглядит более прецизионным методом, позволяющим обеспечить наилучший косметический эффект при проведении оперативных вмешательств в области лицевого скелета.

Ключевые слова: CAD/CAM-импланты, косметический результат, шаблон для остеотомии, одномоментная резекция и реконструкция, опухоли костей черепа, титан, краниопластика, индивидуальные импланты, реконструкция черепа

Для цитирования: Яшин К.С., Зинатуллин Р.Д., Братцев И.С. и др. Резекция опухолей костей черепа с одномоментной пластикой дефекта персонифицированным имплантом. Нейрохирургия 2023;25(4):57–67. DOI: <https://doi.org/10.17650/1683-1683-3295-2023-25-4-57-67>

Resection of tumors of the cranial bones with single-step defect reconstruction using a personalized implant

K.S. Yashin¹, R.D. Zinatullin¹, I.S. Bratsev¹, D.V. Dubrovskiy¹, A.Yu. Ermolaev², M.V. Ostapyuk¹, M.A. Kutlaeva¹, M.V. Rasteryaeva¹, I.A. Medyanik¹, L.Ya. Kravets¹

¹Privolzhsky Research Medical University, Ministry of Health of Russia; 10/1 Minin and Pozharsky Sq., Nizhny Novgorod 603005, Russia;
²M.F. Vladimirovsky Moscow Regional Research and Clinical Institute; 61/2 Shchepkina St., Moscow 129110, Russia

Contacts: Konstantin Sergeevich Yashin yashinmed@yandex.ru

Background. In patients with skull bone tumors, it was demonstrated that not only the oncological but also the cosmetic result has a significant influence on the long-term outcome. The traditional approach to the surgical treatment of tumor lesions of the skull bones is removal of the tumor and intraoperative modeling an artificial bone flap without a template. Recently, the technology of simultaneous resection and computer-aided design/computer-aided manufacturing (CAD/CAM) cranioplasty has received more and more attention.

Aim. To compare the results of surgical treatment of patients with tumors of the cranial bones using the traditional approach (intraoperative formation of a plate to close the defect) and simultaneous resection followed by plastic surgery of the defect with a personalized implant made using preoperative virtual modeling.

Materials and methods. The study included 24 patients with tumors of the skull or meningiomas with extracranial growth. Depending on the surgical procedure, patients were divided into 2 groups: group 1 ($n = 13$) – the technology of simultaneous resection and CAD/CAM cranioplasty; group 2 ($n = 11$) – where surgery was performed using a traditional approach based on intraoperative modeling an artificial bone flap without a template.

Results. There were no statistically significant differences between groups in gender, age, time of surgery, blood loss, or time in hospital. The use of simultaneous resection and CAD/CAM cranioplasty did not demonstrate a statistically significant better result in terms of maintaining skull symmetry compared to the traditional approach. All patients had a good cosmetic result and there were no complications.

Conclusion. The technology of simultaneous resection and CAD/CAM cranioplasty is an effective method of treating patients with neoplasms of the skull bones. Despite the absence of statistically significant differences in the results of treatment of cranial bone tumors between this method and the traditional approach based on intraoperative modeling an artificial bone flap without a template this method seems to be a more precise providing the best cosmetic effect in patients with lesion in fronto-orbital region.

Keywords: CAD/CAM, cosmetic outcome, drilling template, single-step resection and reconstruction, skull bone tumors, titanium cranioplasty, custom-made implants, skull reconstruction

For citation: Yashin K.S., Zinatullin R.D., Bratsev I.S. et al. Resection of tumors of the cranial bones with single-step defect reconstruction using a personalized implant. *Neyrokhirurgiya = Russian Journal of Neurosurgery* 2023;25(4): 57–67. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17650/1683-1683-3295-2023-25-4-57-67>

ВВЕДЕНИЕ

Для пациентов с опухолями костей черепа было показано, что не только онкологический, но и косметический результат лечения оказывает существенное влияние на отдаленные исходы лечения [1, 2]. Функциональные и эстетические результаты оперативного вмешательства имеют особое значение при поражении костей лицевого скелета, где восстановление конгруэнтности черепа представляет собой сложную задачу [3, 4].

Традиционным подходом в хирургическом лечении опухолевых поражений костей черепа является удаление опухоли и одномоментная пластика образовавшегося дефекта черепа с интраоперационным моделированием аутогенными костными трансплантатами, титаном или другими синтетическими материалами [5]. Другим вариантом является оперативное лечение в 2 этапа: на 1-м этапе проводится удаление опухоли, на 2-м – пластика дефекта черепа предварительно изготовленным имплантом [6]. Однако при выборе двух-

этапной тактики необходимо индивидуально оценить риски развития осложнений, связанных с выполнением повторных операций для достижения оптимального косметического эффекта.

Для повышения радикальности хирургической резекции и достижения оптимальной конгруэнтности черепа после проведения реконструкции могут быть использованы виртуальное предоперационное планирование и интраоперационная навигация [4, 5, 7, 8]. В последнее время появляется все большее количество публикаций, в которых представлены результаты одномоментного выполнения резекции костной опухоли и пластики дефекта черепа с помощью индивидуального импланта на основе виртуального планирования границ резекции [5, 9–11].

Цель исследования – сравнить результаты хирургического лечения пациентов с опухолями костей черепа с применением традиционного подхода (интраоперационное формирование пластины для закрытия дефекта) и одномоментной резекции с последующей

пластикой дефекта персонифицированным имплантом, изготовленным с помощью предоперационного виртуального моделирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пациенты. В исследование включены 24 пациента (7 мужчин и 17 женщин) с новообразованиями костей черепа или оболочек головного мозга с экстракраниальным ростом. Медиана возраста пациентов составила 45 лет (диапазон 24–82 года). Критерием включения в исследование являлось наличие опухоли с поражением костей черепа, после удаления которой была одномоментно выполнена пластика образовавшегося дефекта.

С учетом наличия в выборке широкого спектра патологий показаниями к операции в зависимости от конкретной клинической ситуации были: 1) наличие значительного косметического дефекта; 2) прогрессирующий рост опухоли; 3) в случае прорастания опухоли в полость черепа – наличие отека головного мозга, неврологической симптоматики; 4) необходимость верификации процесса.

Всем пациентам проведено одномоментное удаление опухоли и закрытие образовавшегося дефекта черепа. В зависимости от методики выполнения оперативного вмешательства пациенты были разделены на 2 группы: 1-я группа – применение предоперационного планирования области костной резекции и изготовление индивидуального импланта для замещения костного дефекта; 2-я группа – оперативное вмешательство с применением традиционного подхода с интраоперационным формированием пластины для закрытия дефекта черепа. Особенности выбранного хирургического вмешательства обсуждались индивидуально с пациентом с получением добровольного информированного согласия на проведение операции.

Предоперационное планирование области резекции и изготовление индивидуального импланта для краниопластики. Планирование одномоментной резекции и пластики дефекта черепа индивидуальным имплантом проводилось в несколько этапов совместно со специалистами производственных компаний: LOGEEKS DM (ООО «Лоджикс», Новосибирск, Россия), ООО «ИТК «Эндопринт» (Москва, Россия) и ICONLAB (ООО «АйконЛаб Гмбх», Нижний Новгород, Россия).

На 1-м этапе границы опухолевой резекции по срезам компьютерной томографии толщиной 0,5 мм отмечает оперирующий хирург (рис. 1, *a2*, *a3*). Далее следует процесс виртуального моделирования пластины с обработкой поступившего компьютерного изображения, которое оптимизируется, а поверхность подготавливается для дальнейшей работы. После подготовки поверхности намечают линию предстоящей резекции и края будущей пластины с учетом дефекта (рис. 1, *b1*), далее воссоздается анатомическая форма отсутствующего участка кости, основанная на здоро-

вой левой стороне черепа пациента (рис. 1, *b2*). Поверхности в дальнейшем задают толщину, которая и будет являться толщиной итогового изделия (рис. 1, *b3*). Толщину задают с запасом, для того чтобы впоследствии при вырезании модели черепа из готовой пластины было обеспечено максимальное прилегание к черепу. На следующем этапе на основе полученного промежуточного результата формируется 3D-сетка, служащая для облегчения конструкции и лучшей интеграции тканей с поверхностью пластины. На последнем этапе проектирования пластины модель черепа вырезают из модели пластины (рис. 1, *b1*, *b2*). Последующая работа идет уже с шаблонами. Шаблон для резекции создается на основе самого дефекта, а именно на основе резецируемого участка (рис. 1, *b3*). Для предоперационного планирования подготавливают шаблоны – модели черепа и резецируемого участка (рис. 1, *c1–c3*). При производстве титановой пластины детали проходят такие стадии, как выращивание методом DMLS, пескоструйная обработка, ультразвуковая мойка, дезинфекция.

Оперативное вмешательство. У пациентов 1-й группы операция представляла собой повторение всех этапов виртуально смоделированного оперативного вмешательства (рис. 2).

Оперативное вмешательство выполняют под общей анестезией согласно предоперационному виртуальному плану. После выделения поверхности черепа с новообразованием устанавливают шаблон и проводят линию остеотомии по его краю (см. рис. 2, *b2*, *b3*). Далее выполняют остеотомию по линии и удаляют опухоль в пределах здоровой кости (см. рис. 2, *b4*). Затем устанавливают имплант на область дефекта черепа и фиксируют при помощи винтов (см. рис. 2, *b5*).

У пациентов 2-й группы оперативное вмешательство было проведено по традиционной технологии, когда моделирование пластины для закрытия дефекта черепа осуществлялось непосредственно во время операции (см. рис. 2, *b2–b4*).

Еще один пример применения технологии предоперационного планирования области резекции и изготовления индивидуального импланта для краниопластики представлен на рис. 3.

Параметры сравнения групп. Ретроспективный анализ позволил сравнить группы по срокам госпитализации, времени установки пластины, объему интраоперационной кровопотери и наличию послеоперационных осложнений. Анализ данных мультиспиральной компьютерной томографии (МСКТ) проводили в программе Vidar Dicom Viewer 3.1, оценивали площадь дефекта и индекс краниальной симметрии, или CIS (Cranial index of symmetry) [12, 13].

Статистическая обработка данных. Данные были рассчитаны и проанализированы при помощи программы Statistica 10.0 (StatSoft Inc., США), статистическую обработку данных проводили с использованием

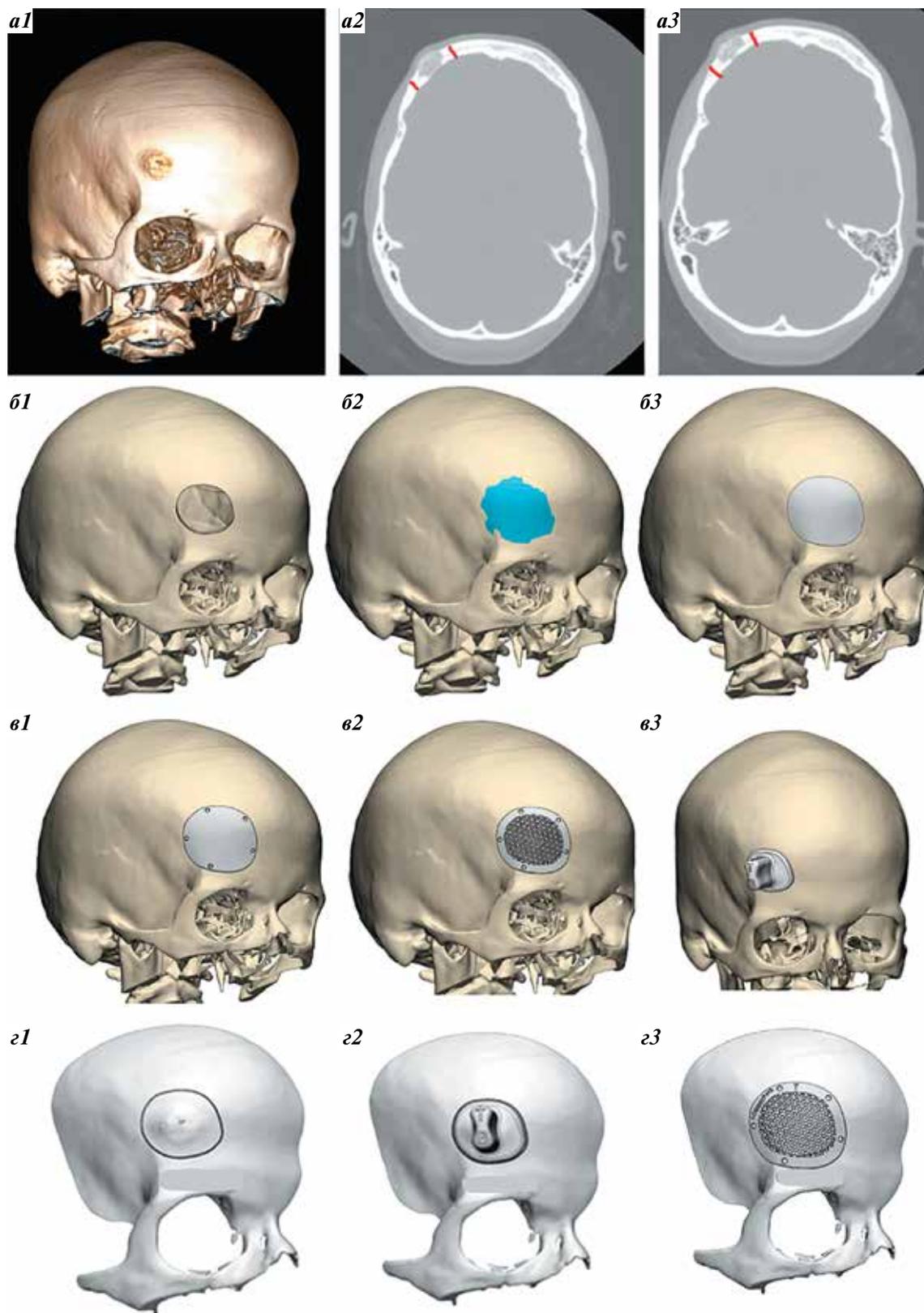


Рис. 1. Предоперационное моделирование одномоментной резекции костной опухоли и пластики образовавшегося дефекта на основе планирования границ резекции хирургом (а1–а3); 3D-моделирование области опухолевой резекции и анатомической формы резецируемой части кости (б1–б3); 3D-моделирование импланта, точек фиксации и резекционного шаблона (з1–з3)

Fig. 1. Preoperative modeling of single-step bone tumor resection and reconstruction of the formed defect based on the surgeon's planning of resection margins (a1–a3); 3D modeling of tumor resection area and anatomical shape of the resected part of the bone (б1–б3); 3D modeling of the implant, fixation points and resection template (з1–з3)

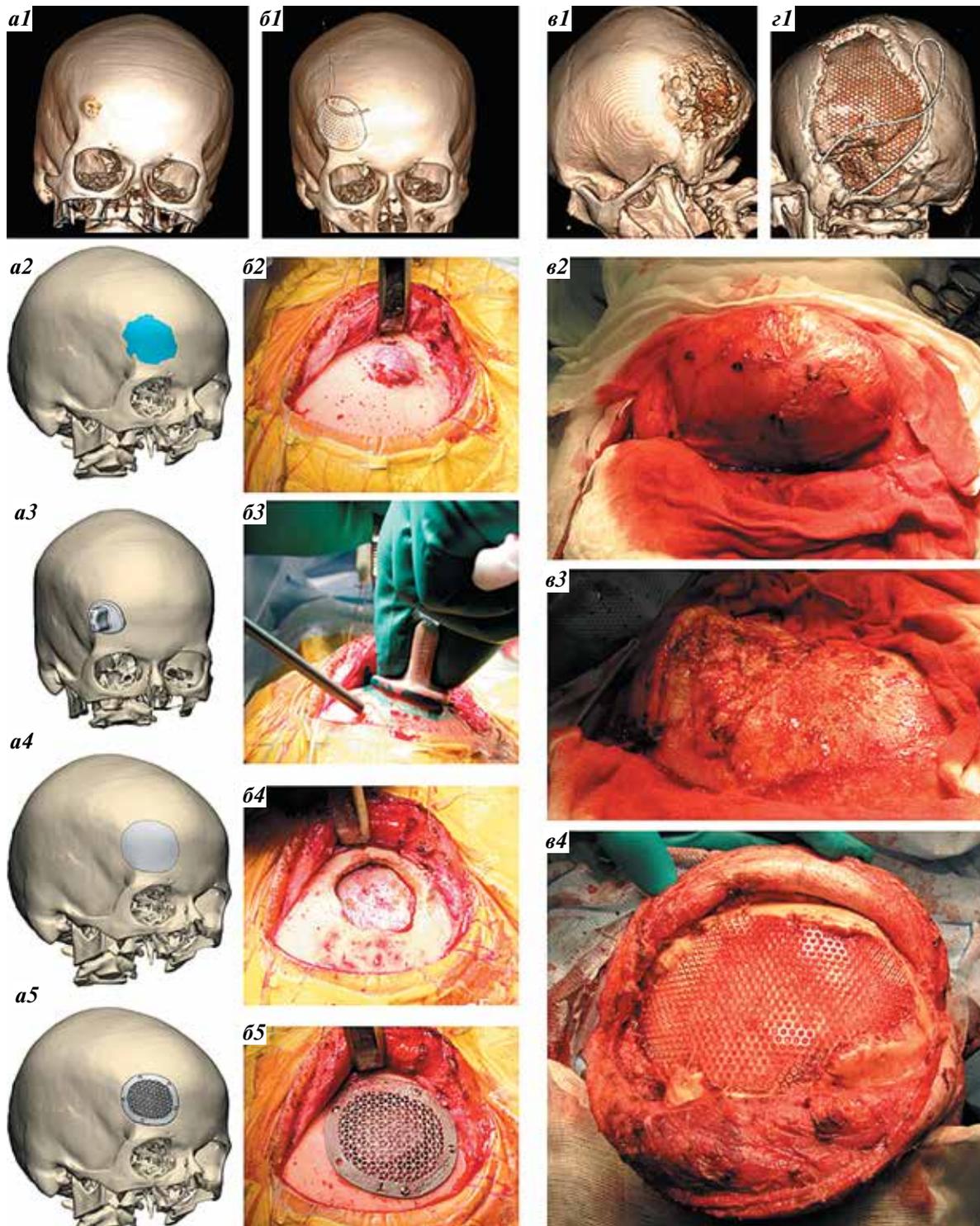


Рис. 2. Резекция опухолей костей черепа (а–з) с одномоментной пластикой дефекта с применением предоперационного моделирования на основе аддитивных технологий (б2–б4) и традиционного подхода (в2–в4). У пациентки, 40 лет, с опухолью лобной кости (а1) выполнена одномоментная операция по удалению опухоли и проведена пластика костного дефекта титановым имплантом (б2–б5) в соответствии с предоперационным виртуальным планированием границ резекции (а2–а5) с использованием шаблона для остеотомии (б3) и с одномоментным выполнением краниопластики (б5). У пациента, 51 года, с гигантской адамантиномой затылочной кости (в1) выполнены одномоментная резекция опухоли и пластика дефекта черепа при помощи материала «Реперен» (в2–в4)

Fig. 2. Resection of cranial bone tumors (a–z) with single-step defect reconstruction using preoperative modeling based on additive technologies (б2–б4) and traditional approach (в2–в4). The female patient, 40 years, with tumor of the frontal bone (a1) underwent single-step surgery with resection and bone defect reconstruction using a titanium implant (б2–б5) in accordance with preoperative virtual planning of resection margins (а2–а5) using osteotomy template (б3) and simultaneous cranioplasty (б5). The male patient, 51 years, with giant adamantinoma of the occipital bone (в1) underwent single-step tumor resection and defect reconstruction using the Reperen material (в2–в4)

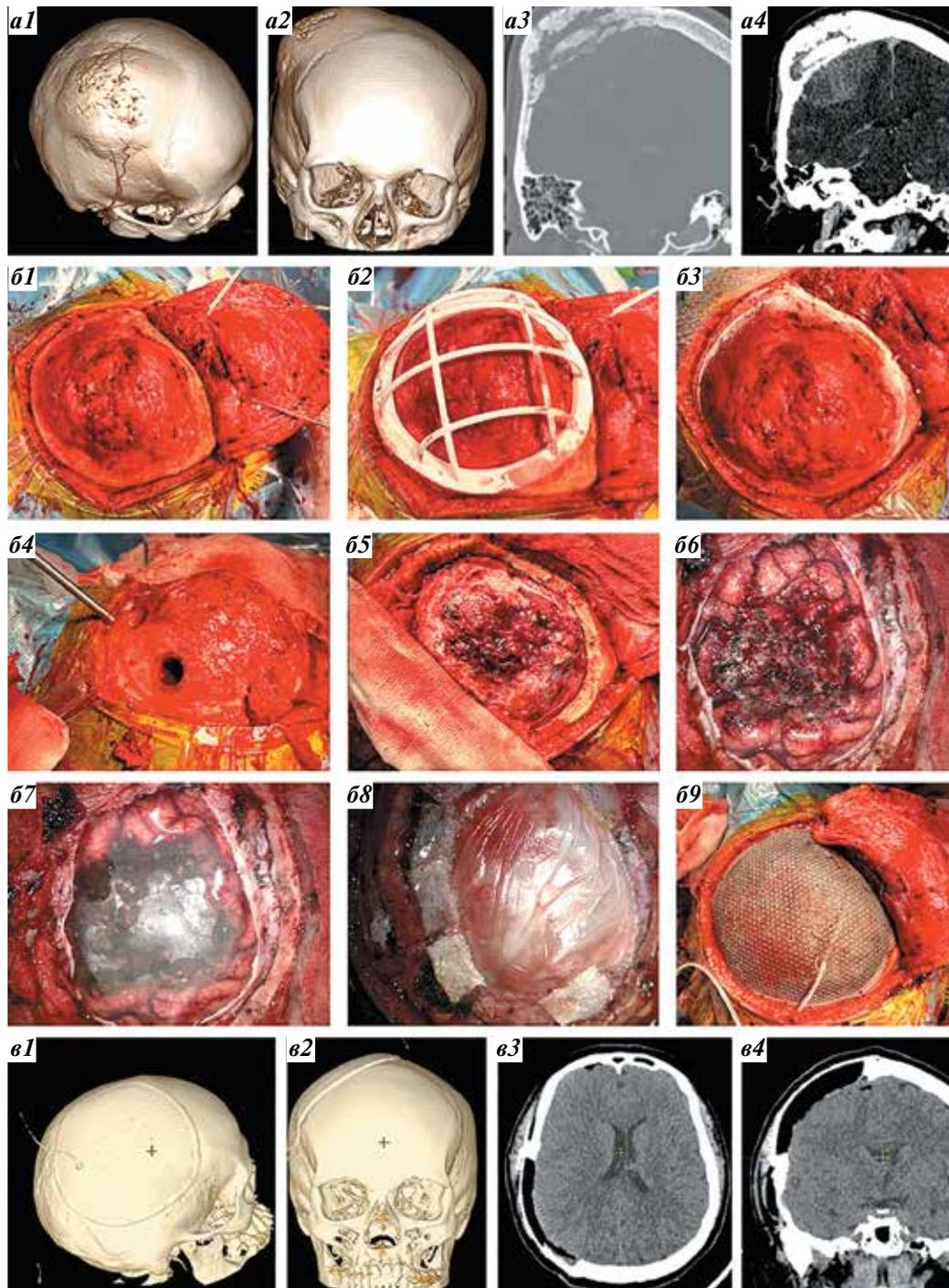


Рис. 3. Резекция гигантской гиперстатической менингиомы правой теменной кости с экстра- и интракраниальным ростом (а1–а4, б1) с одномоментной пластикой дефекта с применением предоперационного 3D-моделирования (в1–в4). На экстракраниальном этапе по изготовленному на предоперационном этапе шаблону для резекции (б2) намечены границы краниотомии (б3), затем выполнена краниотомия из нескольких фрезевых отверстий (б4, б5). Далее под увеличением операционного микроскопа выполнено удаление интракраниального компонента опухоли (б5), плотно спаянного с окружающим мозговым веществом (б6). На заключительном этапе после установки субдуральной мембраны для профилактики рубцово-спаечного процесса (б7) выполнена комбинированная пластика твердой мозговой оболочки при помощи импланта, фибриноген-тромбиновой губки и фибринового герметика (б8). Далее выполнена пластика дефекта черепа при помощи изготовленной на предоперационном этапе титановой пластины (б9)

Fig. 3. Resection of giant hyperstatic meningioma of the right parietal bone and extra- and intracranial growth (a1–a4, б1) with single-step defect reconstruction using preoperative 3D modeling (в1–в4). At the extracranial stage, craniotomy margins (б3) were marked on the preoperative resection template (б2), then craniotomy was performed using several burr holes (б4, б5). Under surgical microscope, resection of the intracranial tumor component (б5) tightly intertwined with the surrounding brain tissue (б6) was performed. At the final stage, after installation of subdural membrane for prevention of scarring process (б7), combination reconstruction of the dura mater using an implant, fibrinogen/thrombin sponge and fibrin glue (б8) was performed. Then the defect was reconstructed using the titanium plate manufactured at the preoperative stage (б9)

критерия χ^2 с поправкой Йетса, U-критерия Манна–Уитни, критерия χ^2 Пирсона. Учитывая ненормальный характер распределения полученных данных, показатели рассчитаны и представлены в виде медиан и значений 25-го и 75-го перцентилей (Me [Q₁; Q₂]). Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сопоставимость групп. Общая характеристика пациентов обеих групп представлена в табл. 1. Медиана возраста пациентов 1-й группы составила 39 лет, 2-й группы – 49 лет ($p = 0,29$). Соотношение мужчин и женщин в обеих группах статистически не различалось. По гистологическому строению образований, поражающих кость, группы также оказались сопоставимы; чаще всего встречались менингиомы, гемангиомы и остеомы. Краниопластика у подавляющего большинства пациентов была выполнена титановой пластиной, однако в обеих группах были пациенты, которым проводилась пластика дефекта черепа при помощи полимерных материалов Рекост® (1-я группа) и Реперен® (2-я группа) (ООО «АйконЛаб Гмбх», Россия).

Результаты оперативных вмешательств. По данным МСКТ группы были сопоставимы по площади дефекта. При этом применение предоперационного 3D-моделирования не продемонстрировало статистически значимого лучшего результата в аспекте степени сохранения симметрии черепа по сравнению с традиционным подходом (табл. 2).

Для пациентов 1-й группы положение имплантов во всех случаях соответствовало предоперационному планированию. Ревизионных оперативных вмешательств не было. В большинстве случаев дополнительного интраоперационного моделирования импланта не потребовалось. Только у 1 пациента имплант был дополнительно смоделирован во время операции с сохранением ветвей *n. supraorbitalis*. В случае протяженной фиброзной дисплазии использование шаблона было невозможным из-за формы и размера резекции.

Количество точек фиксации пластин в 1-й и 2-й группах составило 3 [3; 4] и 4 [4; 6] соответственно ($p = 0,12$) (табл. 3). Общее время операции статистически значимо не различалось в группах и составило 85 мин в 1-й группе и 115 мин во 2-й группе ($p = 0,87$) (см. табл. 3). Интраоперационная кровопотеря в обеих группах не различалась и не превышала 450 мл.

Группы достоверно не различались по срокам пребывания в стационаре – количество послеоперационных койко-дней в 1-й группе составило 5 [4; 7], а во 2-й группе – 4,5 [4; 8] ($p = 0,94$).

У всех пациентов отмечен хороший косметический результат, осложнений не было.

ОБСУЖДЕНИЕ

Технология реконструкции обширных и сложных дефектов черепа с использованием индивидуальных

Таблица 1. Общая характеристика пациентов

Table 1. General characteristics of patients

Характеристика Characteristic	1-я группа (n = 13) Group 1 (n = 13)	2-я группа (n = 11) Group 2 (n = 11)	p
Гендерное распределение, n: Gender distribution, n:			
мужчины men	2	5	0,12*
женщины women	11	6	0,24*
Возраст, Me [Q1; Q2], лет Age, Me [Q1; Q2], years	40 [35; 61]	49 [39; 61]	0,4**
Гистологический тип опухоли, n: Histological type of the tumor, n:			
менингиома meningioma	4	3	
гемангиома hemangioma	3	2	
остеома osteoma	3	3	
эозинофильная гранулема eosinophilic granuloma	0	1	
метастаз metastasis	1	1	0,71***
холестеатома cholesteatoma	1	0	
хондробластома chondroblastoma	1	0	
фиброзная дисплазия fibrous dysplasia	1	0	
невринома neurinoma	0	1	
адамантинома adamantinoma	0	1	
Область поражения, n: Affected area, n:			
лицевой скелет facial skeleton	8	4	0,2***;
вне лицевого скелета outside of facial skeleton	5	7	0,41***
Сторона поражения, n: Affected side, n:			
левая left	5	5	
правая right	8	4	0,2***
средняя medial	0	2	
Материал импланта, n: Implant material, n:			
титан titanium	12	7	0,11*; 0,22*
полимер polymer	1	4	

*Точный критерий Фишера и критерий χ^2 с поправкой Йетса; **U-критерий Манна–Уитни; ***критерий χ^2 Пирсона.

*Fisher's exact test and χ^2 -test with Yates's correction; **Mann–Whitney U-test; ***Pearson's χ^2 -test.

Примечание. Здесь и в таблице 2, 3: Me – медиана; [Q1; Q2] – значения 25-го и 75-го перцентилей распределения.
Note. Here and in table 2, 3: Me – median; [Q1; Q2] – 25th and 75th percentiles.

Таблица 2. Анализ данных мультиспиральной компьютерной томографии, Me [Q1; Q2]

Table 2. Analysis of multispiral computed tomography data, Me [Q1; Q2]

Показатель Indicator	1-я группа (n = 13) Group 1 (n = 13)	2-я группа (n = 11) Group 2 (n = 11)	p
Площадь дефекта, см ² Defect area, cm ²	7,6 [5,9; 8,3]	7,7 [2,6; 20,2]	0,9*
Индекс краниальной симметрии, % Cranial index of symmetry, %	97,8 [96,5; 98,4]	97,7 [96,8; 98,4]	0,93*

*U-критерий Манна–Уитни.

*Mann–Whitney' U-test.

Таблица 3. Интраоперационные данные, Me [Q1; Q2]

Table 3. Intraoperative data, Me [Q1; Q2]

Показатель Indicator	1-я группа (n = 13) Group 1 (n = 13)	2-я группа (n = 11) Group 2 (n = 11)	p
Объем кровопотери, мл Blood loss volume, mL	100 [50; 250]	125 [50; 150]	0,48*
Количество точек фиксации Number of fixation points	4 [3; 7]	4 [4; 6]	0,4*
Длительность операции, мин Operative time, min	180 [75; 310]	115 [55; 180]	0,51*

*U-критерий Манна–Уитни.

*Mann–Whitney' U-test.

имплантов, созданных при помощи компьютерного моделирования, является наиболее перспективным направлением в нейрохирургии и челюстно-лицевой хирургии [14–17]. Оптимальные функциональные и косметические результаты делают данную технологию наиболее предпочтительным методом в клинической практике по сравнению с традиционным подходом, основанным на интраоперационном моделировании импланта. Технология одномоментного выполнения резекции костной опухоли и пластики дефекта черепа с помощью индивидуального импланта на основе виртуального планирования границ резекции также представляется наиболее перспективным подходом при опухолевых поражениях костей черепа, особенно в области лицевого скелета.

Подобные операции по поводу резекций костных опухолей с одномоментной краниопластикой по заранее изготовленному шаблону уже были описаны в литературе на примере пациентов с фиброзной дисплазией и менингиомами с экстракраниальным ростом [9–11, 18]. Данная методика выглядит более удобной для применения в рутинной клинической практике по сравнению с традиционным интраоперационным моделированием импланта не по шаблону [1, 19] или по стереолитографической модели [20].

В настоящем исследовании не было выявлено статистически значимых различий между группами в достижении конгруэнтности формы черепа. Однако мы не применяли удаление опухолей костей черепа с непосредственно интраоперационным моделированием

импланта у пациентов с новообразованиями в области лицевого скелета в случае высоких рисков формирования выраженного косметического дефекта. Таким образом, результаты настоящего исследования демонстрируют, что в подавляющем большинстве случаев при резекции опухолей костей свода черепа не требуется индивидуальный имплант, так как стандартную титановую пластину достаточно легко адаптировать под дефект. Однако при удалении опухолей в области лицевого отдела черепа применение технологии предоперационного моделирования индивидуального импланта и проведение резекции по шаблону выглядит более предпочтительным для достижения оптимального косметического эффекта. В этом контексте данная технология представляет собой универсальный способ удаления образований костей черепа вне зависимости от локализации очага. Стоит также отметить, что использование шаблона для определения границ костной резекции не заменит навигационные системы, особенно при отсутствии и/или плохой визуализации экстракраниального компонента опухоли [8, 21]. Обе технологии дополняют друг друга для определения границ опухоли [7].

Обе группы в нашем исследовании оказались сопоставимы по объему интраоперационной кровопотери, времени оперативного вмешательства, длительности послеоперационного пребывания в стационаре. Кроме того, у пациентов обеих групп не было выявлено послеоперационных осложнений. Несмотря на сопоставимость обеих групп, можно выделить ряд преимуществ

технологии моделирования по созданному на предоперационном этапе шаблону и изготовления индивидуального импланта по сравнению с традиционными методиками: меньшие затраты времени и материальных средств на этапе предоперационной подготовки, так как моделирование является виртуальным, а не физическим; сокращение времени операции — работа по шаблону ускоряет и делает более точным этап резекции, а отсутствие необходимости моделирования пластины во время операции уменьшает время проведения этапа краниопластики [3].

Для краниопластики используются различные аллопластические материалы: гидроксиапатит, полиметилметакрилат, полиэфирэтеркетон, титан и другие активно разрабатываемые материалы [17, 22–24]. Каждый материал имеет как преимущества, так и недостатки, а также определенный уровень потенциальной биотоксичности (за исключением гидроксиапатита). Большая часть из вышеперечисленных стандартных материалов подходит для использования в технологии предоперационного компьютерного моделирования [25]. В настоящем исследовании основным материалом для проведения пластики был титан, так как он способен наиболее полно закрывать область дефекта и дает возможность интраоперационно скорректировать размер костной резекции. Также в случае метастаза рака почки была проведена пластика дефекта с применением костно-замещающего материала «Рекост-М» с хорошим результатом, что соответствует описанным ранее примерам успешного применения полимерных материалов для одноэтапной резекции опухоли и выполнения пластики [11, 26].

При опухолях, поражающих кости черепа, выбор материала для выполнения пластики может иметь значение в связи с возможной необходимостью проведения в дальнейшем лучевой терапии. Титан является оптимальным материалом в случае одноэтапного удаления опухоли с проведением пластики дефекта при доброкачественных опухолях. Данную технологию возможно использовать и при хирургической резекции злокачественных опухолей [27], однако из-за его высокой способности отражать излучение возрастает риск образования лучевых язв мягких тканей головы [28]. В случае злокачественных опухолей следует также отметить необходимость минимизации временных сро-

ков между проведением компьютерной томографии и созданием шаблона, учитывая их быстрый инвазивный рост.

Наше исследование ограничено небольшой выборкой пациентов, поскольку опухолевые поражения черепа встречаются не так часто. В связи с этим отсутствует единое мнение об исключительной необходимости использования одномоментной реконструктивной операции с применением предоперационного компьютерного моделирования индивидуального импланта. Существует большое количество индивидуальных подходов к решению вопросов моделирования и изготовления импланта, а также выбора материала для изготовления пластины. При этом проблемой остается отсутствие единой системы оценки результата в косметическом плане, и в основном анализируется удовлетворенность пациента косметическими результатами операции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология одномоментного выполнения резекции костной опухоли и пластики дефекта черепа с помощью индивидуального импланта на основе виртуального планирования границ резекции является эффективным методом лечения пациентов с новообразованиями костей черепа. Несмотря на отсутствие статистически значимых различий в результатах лечения опухолей костей черепа между данным методом и традиционным подходом с интраоперационным моделированием пластины, виртуальное моделирование операции с изготовлением индивидуального импланта выглядит более прецизионным методом, позволяющим обеспечить наилучший косметический эффект при проведении оперативных вмешательств в области лицевого скелета.

В настоящее время в лечении опухолей костей черепа представлено большое количество индивидуальных решений по одномоментному удалению опухоли и выполнению пластики дефекта черепа, позволяющих в той или иной степени достичь хороших онкологических и эстетических результатов. Однако в основном результаты исследований представляют собой описание единичных или серий случаев. Для стандартизации описанной методики необходимы дальнейшие исследования, включающие большее количество пациентов.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Bloch O., McDermott M.W. *In situ* cranioplasty for hyperostosing meningiomas of the cranial vault. *Can J Neurol Sci* 2011;38(1): 59–64. DOI: 10.1017/s0317167100011082
- Marbacher S., Coluccia D., Fathi A.R. et al. Intraoperative patient-specific reconstruction of partial bone flap defects after convexity meningioma resection. *World Neurosurg* 2013;79(1):124–30. DOI: 10.1016/j.wneu.2011.05.057
- Chen S.-H., Ko A.-T., Chen H.-C. et al. Fronto-naso-orbital reconstructions. *Ann Plast Surg* 2018;81(6S Suppl 1):S10–S4. DOI: 10.1097/sap.0000000000001606
- Ricalde P., Horswell B.V. Craniofacial fibrous dysplasia of the fronto-orbital region: a case series and literature review. *J Oral Maxillofac Surg* 2001;59(2):157–67; discussion 167–8. DOI: 10.1053/joms.2001.20487
- Сыркашев В.А., Новиков В.А., Рябова А.И. и др. Первичная пластика послеоперационных дефектов основания и свода черепа у онкологических больных. *Сибирский онкологический журнал* 2011;(4):54–8. Sarkashev V.A., Novikov V.A., Ryabova A.I. et al. Primary plasty of postoperative skull base and skull vault defects in cancer patients. *Sibirskiy onkologicheskiy zhurnal = Siberian Journal of Oncology* 2011;(4):54–8. (In Russ.).
- Мишинов С.В., Копылов И.С., Пендюрин И.В. и др. Клинический случай многоэтапного хирургического лечения пациента с обширным поражением костей черепа фиброзной дисплазией и последующей реконструкцией индивидуальными титановыми имплантатами. *Современные проблемы науки и образования* 2022;(6–1). DOI: 10.17513/spno.32167 Mishinov S.V., Kopylov I.S., Pendyurin I.V. et al. A clinical case of multi-stage surgical treatment of a patient with extensive fibrous dysplasia of the skull and subsequent reconstruction with individual titanium implants. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education* 2022;(6–1). (In Russ.). DOI: 10.17513/spno.32167
- Guatta R., Scolozzi P. Bone recontouring by guided surgical navigation integrating “mirroring” computational planning in the management of severe fronto-orbital asymmetry in fibrous dysplasia. *J Neurol Surg A Cent Eur Neurosurg* 2018;79(2):181–5. DOI: 10.1055/s-0037-1615286
- Gui H., Zhang S., Shen S.G. et al. Real-time image-guided recontouring in the management of craniofacial fibrous dysplasia. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol* 2013;116(6):680–5. DOI: 10.1016/j.oooo.2013.07.012
- Broeckx C.E., Maal T.J.J., Vreken R.D. et al. Single-step resection of an intraosseous meningioma and cranial reconstruction: technical note. *World Neurosurg* 2017;(108):225–9. DOI: 10.1016/j.wneu.2017.08.177
- Carolus A., Weihe S., Schmieder K. et al. One-step CAD/CAM titanium cranioplasty after drilling template-assisted resection of intraosseous skull base meningioma: technical note. *Acta Neurochir (Wien)* 2017;159(3):447–52. DOI: 10.1007/s00701-016-3053-4
- Oji T., Sakamoto Y., Miwa T. et al. Usefulness of an osteotomy template for skull tumorectomy and simultaneous skull reconstruction. *J Craniofac Surg* 2016;27(6):1565–7. DOI: 10.1097/SCS.0000000000002841
- Zonenshayn M., Kronberg E., Souweidane M.M. Cranial index of symmetry: an objective semiautomated measure of plagiocephaly. *Technical note. J Neurosurg* 2004;100(5 Suppl Pediatrics):537–40. DOI: 10.3171/ped.2004.100.5.0537
- Братцев И.С., Сметанина О.В., Яшин К.С. и др. Краниопластика посттрепанационных дефектов черепа с применением аддитивных технологий 3D-печати. *Нейрохирургия* 2021;23(2):34–43. DOI: 10.17650/1683-3295-2021-23-2-34-43 Brattsev I.S., Smetanina O.V., Yashin K.S. et al. Cranioplasty of post-trepanation skull defects using additive 3D printing technologies. *Neurokhirurgiya = Russian Journal of Neurosurgery* 2021;23(2):34–43. (In Russ.). DOI: 10.17650/1683-3295-2021-23-2-34-43
- Ghai S., Sharma Y., Jain N. et al. Use of 3-D printing technologies in craniomaxillofacial surgery: a review. *Oral Maxillofac Surg* 2018;22(3):249–59. DOI: 10.1007/s10006-018-0704-z
- Чобулов С.А., Кравчук А.Д., Потапов А.А. и др. Современные аспекты реконструктивной хирургии дефектов черепа. *Журнал «Вопросы нейрохирургии» им. Н.Н. Бурденко* 2019;83(2):115–24. DOI: 10.17116/neiro201983021115 Chobulov S.A., Kravchuk A.D., Potapov A.A. et al. Modern aspects of reconstructive surgery of skull defects. *Zhurnal Voprosy neurokhirurgii im. N.N. Burdenko = Burdenko’s Journal of Neurosurgery* 2019;83(2):115–24. (In Russ.). DOI: 10.17116/neiro201983021115
- Mishinov S.V., Stupak V.V., Kororushko N.A. et al. Titanium patient-specific implants in reconstructive neurosurgery. *Biomed Eng* 2018;52(3):152–5. DOI: 10.1007/s10527-018-9802-3
- Еолчийан С.А. Пластика сложных дефектов черепа имплантатами из титана и полиэтерэтеркетона (ПЕЕК), изготовленными по CAD/CAM технологиям. *Журнал «Вопросы нейрохирургии» им. Н.Н. Бурденко* 2014;78(4):3–13. Eolchiyan S.A. Complex skull defects reconstruction with CAD/CAM titanium and polyetheretherketone (PEEK) implants. *Zhurnal Voprosy neurokhirurgii im. N.N. Burdenko = Burdenko’s Journal of Neurosurgery* 2014;78(4):3–13. (In Russ., In Engl.). PMID: 25406805.
- Schebesch K.M., Höhne J., Gassner H.G., Brawanski A. Preformed titanium cranioplasty after resection of skull base meningiomas – a technical note. *J Craniofac Surg* 2013;41(8):803–7. DOI: 10.1016/j.jcms.2013.01.030
- Velnar T., Pregelj R., Limbaeck-Stokin C. Brain meningioma invading and destructing the skull bone: replacement of the missing bone *in vivo*. *Radiol Oncol* 2011;45(4):304–9. DOI: 10.2478/v10019-011-0036-1
- Saringer W., Nöbauer-Huhmann I., Knosp E. Cranioplasty with individual carbon fibre reinforced polymere (CFRP) medical grade implants based on CAD/CAM technique. *Acta Neurochir (Wien)* 2002;144(11):1193–203. DOI: 10.1007/s00701-002-0995-5
- Ahmed M., Soliman S., Noman S.A. et al. Computer-guided contouring of craniofacial fibrous dysplasia involving the zygoma using a patient-specific surgical depth guide. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2020;49(12):1605–10. DOI: 10.1016/j.ijom.2020.04.009
- Cavalu S., Antoniac I.V., Mohan A. et al. Nanoparticles and nanostructured surface fabrication for innovative cranial and maxillofacial surgery. *Materials (Basel)* 2020;13(23):5391. DOI: 10.3390/ma13235391
- Колмогоров Ю.Н., Успенский И.В., Маслов А.Н. и др. Костнозамещающие имплантаты из материала “Рекост-М” на основе 3D-моделирования для закрытия посттрепанационных дефектов черепа: доклинические и клинические исследования. *Современные технологии в медицине* 2018;10(3):95–101. Kolmogorov Y.N., Uspensky I.V., Maslov A.N. et al. Rekost-M bone replacement implants based on 3D modeling for closing post-craniotomy skull defects: pre-clinical and clinical studies. *Sovremennyye tehnologii v medicine = Modern Technologies in Medicine* 2018;10(3):95–101. (In Russ.). DOI: 10.17691/stm2018.10.3.11.
- Корыткин А.А., Орлинская Н.Ю., Новикова Я.С. и др. Биосовместимость и костная интеграция титановых имплантов различной пористости с кальций-фосфатным покрытием и без покрытия. *Современные технологии в медицине* 2021;13(2):52–8. DOI: 10.17691/stm2021.13.2.06 Korytkin A.A., Orlynskaya N.Y., Novikova Y.S. et al. Biocompatibility and osseointegration of calcium phosphate-coated

- and non-coated titanium implants with various porosities. *Sovremennye tehnologii v medicine = Modern Technologies in Medicine* 2021;13(2):52–8. (In Russ.).
DOI: 10.17691/stm2021.13.2.06
25. Zanotti B., Zingaretti N., Verlicchi A. et al. Cranioplasty: review of materials. *J Craniofac Surg* 2016;27(8):2061–72.
DOI: 10.1097/SCS.0000000000003025
26. Wu C.T., Lu T.C., Chan C.S., Lin T.C. Patient-specific three-dimensional printing guide for single-stage skull bone tumor surgery: novel software workflow with manufacturing of prefabricated jigs for bone resection and reconstruction. *World Neurosurg* 2021;147:e416–e27. DOI: 10.1016/j.wneu.2020.12.072
27. Berli J.U., Thomaier L., Zhong S. et al. Immediate single-stage cranioplasty following calvarial resection for benign and malignant skull neoplasms using customized craniofacial implants. *J Craniofac Surg* 2015;26(5):1456–62.
DOI: 10.1097/SCS.0000000000001816
28. Sakamoto Y., Koike N., Takei H. et al. Influence of backscatter radiation on cranial reconstruction implants. *Br J Radiol* 2017;90(1070):20150537. DOI: 10.1259/bjr.20150537

Благодарность. Авторы выражают благодарность компании LOGEEKS DM (ООО «Лоджикс», Новосибирск, Россия) за консультацию и исправления в процессе написания рукописи; директору Университетской клиники ФГБОУ ВО «ПИМУ» Минздрава России (ПИМУ) И.Ю. Арефьеву и заместителю директора Университетской клиники ПИМУ В.Н. Митрофанову за административную поддержку исследования; ректору ПИМУ Н.Н. Карякину за активную поддержку научного исследования и внедрения аддитивных технологий в клиническую практику.

Acknowledgement. The authors express thanks to the LOGEEKS DM Company (Logeks, LLC, Novosibirsk, Russia) for advice and corrections in the process of manuscript writing, to the Director of the University Clinic of the Privolzhsky Research Medical University (PRMU) I.Yu. Arefyev and to the Deputy Director of the University Clinic of the PRMU V.N. Mitrofanov for administrative support of the study, to the Rector of PRMU N.N. Karyakin for active support of scientific research and introduction of additive technologies into clinical practice.

Вклад авторов

К.С. Яшин: разработка концепции и дизайна исследования, получение данных для анализа, анализ полученных данных, обзор публикаций по теме статьи, написание текста статьи;
Р.Д. Зинатуллин: получение данных для анализа, формирование итоговой базы данных;
И.С. Братцев: разработка методологии анализа, анализ полученных данных;
Д.В. Дубровский: получение данных для анализа;
А.Ю. Ермолаев, М.В. Остапюк: получение данных для анализа, редактирование текста статьи;
М.А. Кутлаева, М.В. Растеряева: анализ данных компьютерной томографии;
И.А. Медяник, Л.Я. Кравец: разработка концепции и дизайна исследования, редактирование текста статьи, утверждение окончательной версии статьи для публикации.

Authors contributions

K.S. Yashin: development of the concept and design of the study, obtaining data for analysis, analysis of the data obtained, review of publications on the topic of the article, article writing;
R.D. Zinatullin: obtaining data for analysis, forming a final database;
I.S. Bratsev: development of an analysis methodology, analysis of the data obtained;
D.V. Dubrovskiy: obtaining data for analysis;
A.Yu. Ermolaev, M.V. Ostapyuk: obtaining data for analysis, editing of the article;
M.A. Kutlaeva, M.V. Rasteryaeva: analysis of computed tomography data;
I.A. Medyanik, L.Ya. Kravets: development of the concept and design of the study, editing of the article, approval of the final version of the article for publication.

ORCID авторов / ORCID of authors

К.С. Яшин / K.S. Yashin: <https://orcid.org/0000-0002-5723-7389>
Р.Д. Зинатуллин / R.D. Zinatullin: <https://orcid.org/0009-0005-2393-8004>
И.С. Братцев / I.S. Brattsev: <https://orcid.org/0000-0002-1630-7053>
Д.В. Дубровский / D.V. Dubrovskiy: <https://orcid.org/0009-0008-9051-8562>
А.Ю. Ермолаев / A.Yu. Ermolaev: <https://orcid.org/0000-0001-5326-9685>
М.В. Остапюк / M.V. Ostapyuk: <https://orcid.org/0000-0002-0418-5597>
М.А. Кутлаева / M.A. Kutlaeva: <https://orcid.org/0009-0006-7384-3801>
М.В. Растеряева / M.V. Rasteryaeva: <https://orcid.org/0000-0002-8462-3824>
И.А. Медяник / I.A. Medyanik: <https://orcid.org/0000-0002-7519-0959>
Л.Я. Кравец / L.Ya. Kravets: <https://orcid.org/0000-0002-9484-6992>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания (тема № 0128-2021-0012).

Funding. The work was performed within the framework of the state assignment (topic No. 0128-2021-0012).

Статья поступила: 25.09.2023. **Принята к публикации:** 24.10.2023.

Article received: 25.09.2023. **Accepted for publication:** 24.10.2023.