

<https://doi.org/10.36425/rehab56387>

Реконструкция дефектов костей свода черепа с применением CAD/CAM-технологии на этапе реабилитации: состояние проблемы

А.Н. Воробьев¹, И.В. Пряников^{1,2}, А.В. Яковлева¹, А.А. Шайбак¹

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научно-клинический центр реаниматологии и реабилитологии», Москва, Российская Федерация

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов», Москва, Российская Федерация

Количество пострадавших с посттравматическими и посттрепанационными дефектами костей свода черепа, которым необходимо восстановление целостности черепа, ежегодно растет. Тенденция обусловлена ростом числа тяжелых черепно-мозговых травм, также расширением показаний к декомпрессивной трепанации черепа, в частности при черепно-мозговой травме, сосудистой патологии, нейроонкологии с целью купирования гипертензионно-дислокационного синдрома. Проведение краниопластики на этапе ранней реабилитации пациентам после декомпрессивной трепанации черепа является важным условием эффективности реабилитационных мероприятий. В настоящее время в качестве материала для имплантата активно используются титан, полиэфирэфиркетон (РЕЕК), полиметилметакрилат (РММА) и гидроксиапатит. К сожалению, ни один из применяемых синтетических материалов не отвечает условиям «идеального имплантата» на 100%. Для достижения абсолютной точности имплантата, повторяющего отсутствующую часть кости черепа пациента, применяются CAD/CAM-технологии 3D-печати, что особенно актуально при наличии обширных и сложных дефектов. Использование компьютерных возможностей на дооперационном этапе непосредственно в медицинском учреждении, где будет проводиться краниопластика, позволяет избежать дополнительной логистики, сократить время от поступления пациента в стационар до операции и уменьшить расходы на производство имплантатов, сделав их более доступными для учреждений здравоохранения. Отсутствие необходимости интраоперационной подгонки имплантата также существенно сокращает время операции, уменьшает риск инфекционных осложнений и осложнений, связанных с длительной общей анестезией. Благоприятное течение послеоперационного периода позволяет возобновить реабилитационные мероприятия на 3–4-е сутки после краниопластики.

Ключевые слова: 3D-технология; краниопластика; реабилитация; дефекты черепа.

Для цитирования: Воробьев А. Н., Пряников И. В., Яковлева А. В., Шайбак А. А. Реконструкция дефектов костей свода черепа с применением CAD/CAM-технологии на этапе реабилитации: состояние проблемы. *Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация*. 2021;3(1):40–47. DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab56387>

Поступила: 21.12.2020 **Принята:** 09.03.2021 **Опубликована:** 07.04.2021

Список сокращений

CAD (computer aided design) — компьютерный дизайн имплантата

CAM (computer aided manufacturing) — система компьютерного управления

РЕЕК (polyether ether ketone, полиэфирэфиркетон) — полукристаллический полимер

с высокотемпературной устойчивостью

РММА (poly(methyl methacrylate, полиметилметакрилат) — синтетический виниловый полимер

Обоснование

Количество пострадавших с посттравматическими и посттрепанационными дефектами костей свода черепа, которым необходимо восстановление целостности черепа, ежегодно растет, что обусловлено ростом числа тяжелых черепно-мозговых травм, а также расширением показаний к декомпрессивной трепанации черепа, связанных с черепно-мозговой травмой, сосудистой патологией, нейроонкологией для купирования гипертензионно-дислокационного синдрома (рис. 1) [1–3]. В дальнейшем при стабилизации состояния и исчезновении риска вклинения вещества мозга наличие дефектов костей свода черепа вызывает

Reconstruction of Valvular Bones Defects Using CAD/CAM Technology at the Stage of Rehabilitation: State of the Problem

A.N. Vorobyev¹, I.V. Pryanikov^{1, 2}, A.V. Yakovleva¹, A.A. Shaybak¹

¹ Federal Research and Clinical Center of Intensive Care Medicine and Rehabilitology, Moscow, Russian Federation

² Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russian Federation

The number of victims with difficult defects of the skull bones, which should restore the integrity of the skull is growing annually, both in connection with the increase in severe traumatic brain injury (TBI), and in connection with the expansion of indications for decompressive craniotomy not only in traumatic brain injury, but also vascular disease, neuro-Oncology for the relief of hypertension-dislocation syndrome. Cranioplasty at the stage of early rehabilitation of patients after decompressive craniotomy is an important condition for effective rehabilitation measures. Currently, titanium, polyether ethyl ketone (PEEK), polymethyl methacrylate (PMMA) and hydroxyapatite are actively used as the material for the implant. Unfortunately, none of the synthetic materials used meet the conditions of the «perfect implant» by 100%. CAD/CAM 3D printing technologies are used to achieve absolute accuracy of the implant that replicates the missing part of the patient's skull bone, which is especially important in the presence of extensive and complex defects. The use of this technology at the preoperative stage directly in the medical institution where the cranioplasty will be performed avoids additional logistics, reduces the time from the patient's admission to the hospital before the operation and reduces the cost of manufacturing implants, making them more accessible to healthcare institutions. also, the absence of the need for intraoperative implant adjustment significantly reduces the operation time, reduces the risk of infectious complications and complications associated with prolonged general anesthesia. The favorable course of the postoperative period allows you to resume rehabilitation activities on the third or fourth day after cranioplasty.

Keywords: 3D-dimensional; cranioplasty; rehabilitation; defects of the skull bones.

For citation: Vorobyev AN, Pryanikov IV, Yakovleva AV, Shaybak AA. Reconstruction of Valvular Bones Defects Using CAD/CAM Technology at the Stage of Rehabilitation: State of the Problem. *Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation*. 2021;3(1): 40–47. DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab56387>

Received: 21.12.2020 **Accepted:** 09.03.2021 **Published:** 07.04.2021

у пациентов «синдром трепанированного черепа», который включает в себя головные боли, в том числе связанные с изменением условий окружающей среды, невротические и депрессивные расстройства, косметические дефекты в виде западения кожного лоскута в области дефекта, а также выпячивание интракраниального содержимого в трепаниционное окно при физических нагрузках, кашле, чихании и т. д. Таким пациентам необходимо восстановление целостности черепа не только с косметической, но и лечебной целью [2, 4].

В современных работах на эту тему показано, что краниопластика после декомпрессивной трепанации черепа может улучшить неврологический статус пациента, особенно выполненная в ранние сроки после декомпрессивной краниотомии, что имеет большое значение для дальнейшей реабилитации и ее сроков [5, 6]. В настоящее время оптимальными сроками для проведения пластики дефектов костей свода черепа считается интервал от 1 до 6 мес после декомпрессивной краниотомии [1, 4]. Несмотря на кажущуюся простоту этой операции, краниопластика остается довольно тру-

Рис. 1. 3D-реконструкция данных компьютерной томографии пациента с дефектом костей свода черепа.



доемкой и кропотливой процедурой для челюстно-лицевых и нейрохирургов, связанной с потенциальным риском осложнений [7–9].

Выбор материала имплантата

Еще одной темой, активно обсуждаемой в современной научной литературе, является выбор материала имплантата для краниопластики. Пластика дефектов костей черепа возможна ауто-, алло- или ксеноимплантатами [4, 7].

Использование аллоимплантатов для этих целей в настоящее время прекращено, что обусловлено большим, чем при других видах имплантации, числом послеоперационных осложнений (резорбция, риск отторжения, риск инфекционных заражений, в том числе вирусом иммунодефицита человека, гепатитом и т.д.), а также этическими вопросами (использование костей черепа умерших людей).

Аутокость для краниопластики применяется по настоящее время. Однако результаты целого ряда исследований показывают, что по сравнению с синтетическими материалами стерилизованная аутокость имеет наибольший процент гнойно-септических осложнений после операции. При пластике дефектов костей черепа аутокостью существует также риск послеоперационной частичной или полной резорбции костного имплантата (с вероятностью от 25 до 50%). Это связано с тем, что организм начинает воспринимать стерилизованную аутокость как чужеродную и через реакцию асептического воспаления «растворяет» ее [2, 7, 10]. Учитывая указанные недостатки, а также то, что сохранить аутокость после декомпрессивной трепанации черепа или черепно-мозговой травмы с оскольчатыми переломами черепа не всегда представляется возможным, с развитием реконструктивной хирургии последствий черепно-мозговой травмы для проведения краниопластики были разработаны и внедрены в клиническую практику синтетические материалы, так называемые ксенотрансплантаты.

Для ксенотрансплантатов, применяемых в краниопластике в настоящее время, существует ряд требований, определяющих «идеальный» материал. Имплантат должен быть достаточно прочным, чтобы осуществлять защитную функцию по отношению к интракраниальному содержимому; он должен быть абсолютно биологически инертным, точно повторять форму отсутствующей части костей черепа, а также не вызывать гнойно-септических осложнений или реакций отторжения после операции [1, 11]. К сожалению, ни один из применяемых в настоящее время синтетических материалов не отвечает данным условиям на 100% [1, 7, 11].

Исторически применялись абсолютно различные синтетические материалы для краниопластики, большинство из которых, по объективным причинам, в настоящее время не используется. Так, первым металлом, успешно примененным в пластике дефектов костей

черепа, был алюминий (Booth и Curtis, 1893). В различные исторические периоды для этих целей применялись также сталь, золото, серебро, тантал, которые имели свои существенные недостатки и в настоящее время не используются. Из синтетических материалов для краниопластики наибольшее распространение получили и в настоящее время успешно применяются титан, полиэфирэфиркетон (polyether ether ketone, ПEEK), полиметилметакрилат (poly(methyl methacrylate, РММА) и гидроксипатит [12–14].

Ксенотрансплантаты из титана. Применяются два варианта материала. Первый — титановая сетка (рис. 2), из которой фабрично или в условиях операционной происходит формирование имплантата. Титановая сетка податлива, ее можно формировать вручную. Соответственно, при определенных физических воздействиях имплантаты из такого материала деформируются, что может потребовать ревизии или их замены. Вторым вариантом — фабрично изготовленные имплантаты из титана. Такие изделия прочны, но их интраоперационная подгонка при несоответствии краям дефекта затруднительна и занимает много времени. Изготовление подобных имплантатов возможно с применением технологии 3D-печати при сплавлении титанового порошка. При этом могут образовываться побочные продукты, абсолютная безопасность которых для организма пациента не доказана. Другими проблемами имплантатов из титана, кроме их высокой стоимости, можно назвать снижение качества жизни пациентов: так, при утере свидетельства об их установке у человека ограничиваются возможности для общей диагностики, в том числе проведения магнитно-резонансной томографии, к тому же титановый имплантат дает положительный сигнал на всех системах металлодетекции, что создает дополнительные неудобства при перемещениях пациента [11, 13, 14].

Ксенотрансплантаты на основе РММА (рис. 3). Основная проблема связана с гнойно-воспалительными осложнениями: по данным разных авторов, отмечается от 6,25 до 80% гнойно-септических осложнений [7, 9]. Среди других проблем стоит отметить следующие:

- сложность работы с материалом: анатомически точный имплантат может быть сформирован только при помощи пресс-формы, что требует время на ее изготовление, но даже применение пресс-формы требует доработки имплантата интраоперационно после застывания;
- пресс-форма не может быть изготовлена в операционной;
- большая усадка, низкая степень однократного отверждения, низкая механическая прочность и низкая бактериальная устойчивость;

Рис. 2. Интраоперационная фотография имплантата из титановой сетки, уложенного на дефект костей свода черепа.



Рис. 3. Имплантат из полиметилметакрилата (РММА).



Рис. 4. Производство модели дефекта черепа и пресс-формы имплантата при помощи лазерной стереолитографии.



- высокая стоимость;
- отсутствие российских производителей РММА (все материалы необходимо приобретать у иностранных поставщиков, что ведет к снижению доступности для пациентов);
- при переходе из «мягкого» в «твердое» состояние материал выделяет много тепла, долго остывает, а до застывания его остатки при попадании на другие предметы приклеиваются к поверхностям, при этом удаление после застывания весьма проблематично.

Гидроксиапатит является природным материалом, одним из компонентов костной ткани. Единственный ксенотрансплантат, который со временем замещается костной тканью. К его недостаткам можно отнести высокую стоимость, хрупкость до замещения костной тканью, а также необходимость только фабричного производства имплантов.

Полиэфирэфиркетон (РЕЕК) — высокотемпературный пластик, достаточно прочный и биологически инертный — успешно применяется в настоящее время для производства имплантатов как в нейрохирургии (в том числе спинальной), так и ортопедии и стоматологии. Единственным вариантом материала на сегодняшний день, сертифицированным для производства медицинских имплантатов, который достаточно дорог, поскольку производится за рубежом, является РЕЕК ОРТИМА [15].

Выбор способа моделирования имплантата

Наибольшие трудности при восстановлении нормальных контуров и конфигурации свода черепа возникают в случаях дефектов больших размеров и/или сложной формы. В связи с этим большую роль

играет не только выбор пластического материала, но и способ моделирования имплантата. Моделирование имплантатов во время операции сужает выбор пластического материала, снижает предсказуемость косметического результата, увеличивая при этом длительность хирургического вмешательства. В последние годы в медицинскую практику внедряются современные компьютерные технологии по производству индивидуальных имплантатов с целью устранения дефектов черепа на основе данных спиральной компьютерной томографии (см. рис. 1). Они позволяют изготовить имплантат практически из любого синтетического материала прямым или непрямым способом [15]. При непрямом изготовлении предварительно методом компьютерного моделирования создается дизайн имплантата (computer aided design, CAD). Затем методом быстрого прототипирования выполняется его шаблон [16]. Примером может являться методика производства стереолитографических моделей черепа пациента с областью костного дефекта и пресс-формы для изготовления имплантатов из РММА (рис. 4). Индивидуальный имплантат из РММА готовится по пресс-форме вручную, что может отражаться на его точности и требует определенного опыта со стороны хирурга [11, 15]. Методика предусматривает возможность проведения доработки имплантата на стерильных моделях и их подгонку к краям дефекта высокоскоростными фрезами.

Более совершенным является прямое промышленное изготовление индивидуальных имплантатов из титана, полимерных материалов, керамики с использованием различных производственных технологий: высокоскоростного фрезерования, селективного лазерного спекания, литья на высокоточных станках,

оснащенных системой компьютерного управления (computer aided manufacturing, CAM) [6, 15]. Все указанные технологии производства имплантатов предусматривают определенную логистику, так как производство моделей и самих изделий производится вне лечебного учреждения, где будет проводиться пластика дефекта костей черепа. А, как известно, любая логистика подразумевает под собой затраты времени и ресурсов, что сказывается на сроках проведения операции и конечной стоимости имплантата.

Технология 3D-печати также относится к CAD/CAM-технологиям (рис. 5). 3D-печать является технологией производства, суть которой заключается в том, что при помощи специального устройства (3D-принтер) материал (например, металл или пластик) укладывается слоями, сплавляемыми под высокой температурой, чтобы получить цельный объемный объект. Использование технологии 3D-печати в медицине началось с диагностики заболеваний и образовательных моделей для обучения. В настоящее время технология 3D-печати — это также разработка и производство медицинских приборов и хирургических имплантатов. В медицине 3D-печать может оказать важное влияние на то, как пациенты будут лечиться от различных заболеваний в ближайшем будущем. Эта инновационная технология используется в настоящее время для трехмерной печати костей, ушей, экзоскелетов, воздухопроводов, роговицы и кровеносных сосудов [17, 18].

Применение технологии 3D-печати для производства имплантатов костей свода черепа на доопе-

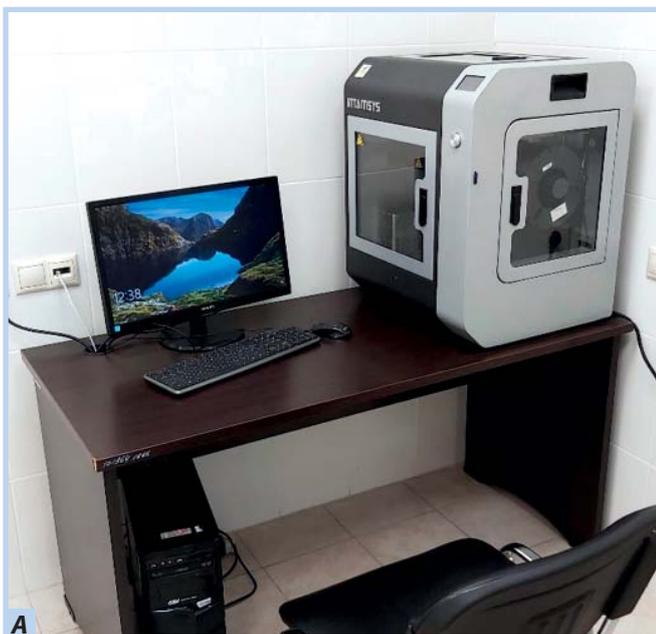
рационном этапе непосредственно в медицинском учреждении, где будет проводиться краниопластика, позволит избежать дополнительной логистики, сократить время от поступления пациента в стационар до операции, снизить операционное время и уменьшить расходы на производство имплантатов, сделав их более доступными для учреждений здравоохранения. Использование CAD/CAM-технологий 3D-печати при проведении краниопластики позволяет добиться абсолютной точности производимого имплантата, повторяющего отсутствующую часть кости черепа пациента (рис. 6), в результате чего исчезает необходимость этапа интраоперационной подгонки имплантата под дефект, что сокращает время операции и уменьшает риск инфекционных осложнений и осложнений, связанных с длительной общей анестезией.

Алгоритм нейрохирургического лечения

Показаниями к пластике дефекта костей свода черепа являются:

- наличие дефекта костей свода черепа;
- наличие синдрома «трепанированного черепа»;
- головная боль, связанная с наличием дефекта костей свода черепа;
- косметический дефект, связанный с наличием дефекта костей свода черепа;
- астеноневротические нарушения, связанные с наличием дефекта костей свода черепа;
- снижение качества жизни пациента, связанное с наличием дефекта костей свода черепа.

Рис. 5. Фото 3D-принтера с рабочей станцией для создания 3D-моделей (А) и пример напечатанной модели черепа пациента с дефектами костей (Б).



Абсолютные противопоказания к проведению краниопластики:

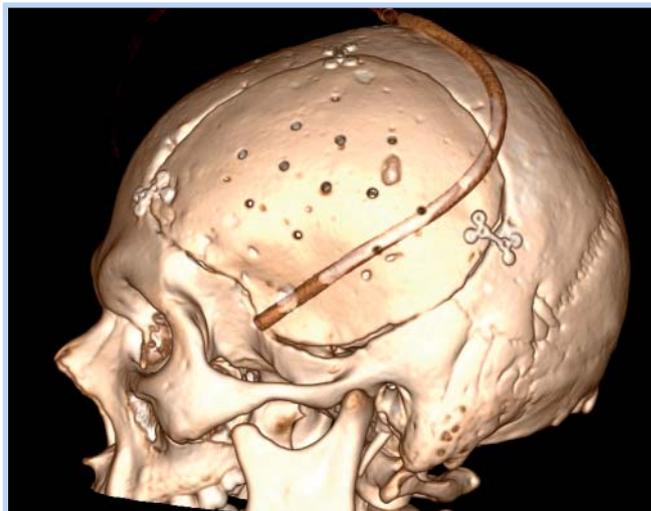
- кома II–III степени;
- высокий операционно-анестезиологический риск (ASA 5);
- нестабильная гемодинамика (необходимость проведения вазопрессорной поддержки);
- внутричерепная гипертензия;
- злокачественное новообразование головного мозга.

Все относительные противопоказания — это общие противопоказания к проведению плановой хирургической операции, связанные в основном с наличием острого или хронического инфекционного процесса у пациента или изменениями лабораторных показателей, требующими коррекции [19, 20].

Выбор материала для краниопластики и способа изготовления имплантата является в каждом случае индивидуальным и зависит от множества факторов. Предпочтительно применение имплантатов из сертифицированных для имплантации материалов, изготовленных по CAD/CAM-технологии [11, 15, 19].

Операция выполняется под общим наркозом. Предоперационная подготовка проводится по стандартной методике перед плановой операцией. Если пациент получает антикоагулянты, их временная отмена должна произойти за сутки до операции. Если пациент получает варфарин или иные антикоагулянты, временная отмена которых невозможна, то на время операции и послеоперационного периода его переводят на низкомолекулярные гепарины в профилактической дозировке. Разрез кожи должен быть достаточным, чтобы выделить края дефекта костей свода черепа на всем протяжении. Во время проведения декомпрессивной краниотомии на предыдущем пластике этапе лечения важно выполнять расширяющую пластику твердой мозговой оболочки, а не просто вскрывать или иссекать ее, так как во время отделения кожно-апоневротического лоскута в области дефекта костей свода черепа отделение рубцово-измененной мозговой ткани достаточно травматично и связано с высоким риском кровотечения и образования послеоперационных внутримозговых гематом. В случае когда часть твердой мозговой оболочки в области дефекта отсутствует, или во время выделения кожно-апоневротического лоскута происходит ее повреждение и истечение спинномозговой жидкости в рану, следующим этапом необходимо выполнить пластику твердой мозговой оболочки с целью ее герметизации и профилактики послеоперационной раневой ликвореи. Следующим этапом, когда дефект костей свода черепа выделен на всем протяжении, про-

Рис. 6. Данные 3D-реконструкции спиральной компьютерной томографии пациента с установленным имплантатом костей свода черепа.



исходит установка изготовленного по CAD/CAM-технологии имплантата на дефект и его фиксация к краям костного дефекта титановыми винтами с/без титановых мини-пластин. Имплантат должен быть плотно прикреплен к костям свода черепа, чтобы избежать в дальнейшем его дислокации при воздействии на эту область внешних сил [11, 19]. Следует отметить, что важно на всех этапах операции проводить тщательный гемостаз для предупреждения образования гематомы в области имплантата после операции. В конце операции ставится подкожный раневой дренаж над имплантатом с системой активной аспирации для удаления в послеоперационном периоде из раны остаточной крови и экссудата. В случае благоприятного течения послеоперационного периода раневой дренаж удаляется в конце первых суток после операции. Выбор препарата и длительности периоперационной антибиотикопрофилактики регламентированы федеральными клиническими рекомендациями Национальной ассоциации по контролю инфекций, связанных с оказанием медицинской помощи, «Принципы организации периоперационной антибиотикопрофилактики в учреждениях здравоохранения» (2014) [21]. В послеоперационном периоде пациенту проводятся также симптоматическая терапия и анальгезия. При необходимости назначения антикоагулянтов после операции это возможно не ранее третьих суток послеоперационного периода. Реабилитационные мероприятия также возможно возобновить в полном объеме не ранее третьих суток после операции при условии благоприятного течения послеоперационного периода [1, 22].

Заключение

Проведение краниопластики на этапе ранней реабилитации пациентам после декомпрессивной трепанации черепа является важным условием для эффективного проведения реабилитационных мероприятий. В настоящее время в качестве материала для имплантата активно используются титан, полиэфирэфиркетон (РЕЕК), полиметилметакрилат (РММА) и гидроксиапатит. К сожалению, ни один из применяемых синтетических материалов не отвечает условиям «идеального имплантата» на 100%. Для достижения абсолютной точности имплантата, повторяющего отсутствующую часть кости черепа пациента, применяются САД/САМ-технологии 3D-печати, что особенно актуально при наличии обширных и сложных дефектов. Применение данной технологии на дооперационном этапе непосредственно в медицинском учреждении, где будет проводиться краниопластика, позволяет избежать дополнительной логистики, сократить время от поступления пациента в стационар до операции и уменьшить расходы на производство имплантатов, сделав их более доступными для учреждений здравоохранения. Отсутствие необходимости интраоперационной подгонки имплантата существенно сокращает время операции, уменьшает риск инфекционных осложнений и осложнений, связанных с длительной общей анестезией. Благоприятное течение послеоперационного периода позволяет возобновить реабилитационные мероприятия на 3–4-е сут после проведения краниопластики.

Источник финансирования

Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Список литературы / References

1. Потапов А.А., Кравчук А.Д., Лихтерман Л.Б. и др. Реконструктивная хирургия дефектов черепа. Клинические рекомендации. Москва, 2015. [Potapov AA, Kravchuk AD, Likhberman LB, et al. Reconstructive surgery of skull defects. Clinical recommendations. Moscow; 2015. (In Russ).]
2. Коновалов А.Н., Пилипенко Ю.В., Элиава Ш.Ш. Технические особенности и осложнения краниопластики у пациентов после декомпрессивной трепанации черепа в остром периоде субарахноидального кровоизлияния // Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко. 2018. Т. 82, № 5. С. 88–95. [Konovalov AN, Pilipenko YuV, Eliava ShSh. Technical features and complications of cranioplasty in patients after decompressive craniectomy in

Funding source

This study was not supported by any external sources of funding.

Конфликт интересов

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Competing interests

The authors declare that they have no competing interests.

Вклад авторов

А. Н. Воробьёв — проведение хирургического лечения, сбор и обработка данных, написание текста статьи; **И. В. Пряников** — общее руководство, редактирование текста статьи; **А. В. Яковлева** — написание текста статьи; **А. А. Шайбак** — сбор и обработка данных.

Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Author contribution

A. N. Vorobyev — conducting surgical treatment, collecting and processing data, writing the text of the article; **I. V. Pryanikov** — general management, editing the text of the article; **A. V. Yakovleva** — writing the text of the article; **A. A. Shaybak** — data collection and processing. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

the acute period of subarachnoid hemorrhage. *Burdenko's journal of neurosurgery*. 2018;82(5)88–95. (In Russ.) doi: 10.17116/neuro20188205188

3. Pallesen LP, Barlinn K, Puetz V. Role of Decompressive Craniectomy in Ischemic Stroke. *Front Neurol*. 2019;9: 1119. doi: 10.3389/fneur.2018.01119
4. Hutchinson PJ, Koliass AG, Tajsic T, et al. Consensus Statement From the International Consensus Meeting on the Role of Decompressive Craniectomy in the Management of Traumatic Brain Injury. *Acta Neurochir*. 2019 161:1261–1274. doi: 10.1007/s00701-019-03936-y
5. Malcolm JG, Rindler RS, Chu JK, et al. Early cranioplasty is associated with greater neurological improvement:

- a systematic review and meta-analysis. *Neurosurgery*. 2018; 82(3):278–288. doi: 10.1093/neuros/nyx182
6. Alkhaibary A, Alharbi A, Alnefaie N, et al. Cranioplasty: A Comprehensive Review of the History, Materials, Surgical Aspects, and Complications. *World Neurosurg*. 2020;139:445–452. doi: 10.1016/j.wneu.2020.04.211
 7. Leão RS, Maior JR, Lemos CA, et al. Complications with PMMA compared with other materials used in cranioplasty: a systematic review and meta-analysis. *Braz Oral Res*. 2018;32:e31. doi: 10.1590/1807-3107bor-2018.vol32.0031
 8. Robles LA, Cuevas-Solórzano A. Massive brain swelling and death after cranioplasty: a systematic review. *World Neurosurg*. 2018;111:99–108. doi: 10.1016/j.wneu.2017.12.061
 9. Асланов Б.И., Зуева Л.П., Колосовская Е.Н. и др. Принципы организации периоперационной антибиотикопрофилактики в учреждениях здравоохранения. Федеральные клинические рекомендации. Москва, 2014. 42 с. [Aslanov BI, Zueva LP, Kolosovskaya EN, et al. Principles of organization of perioperative antibiotic prophylaxis in healthcare institutions. Federal clinical guidelines. Moscow; 2014. 42 p. (In Russ).]
 10. Malcolm JG, Mahmooth Z, Rindler RS, et al. Autologous cranioplasty is associated with increased reoperation rate: a systematic review and meta-analysis. *World Neurosurg*. 2018;116:60–68. doi: 10.1016/j.wneu.2018.05.009
 11. Khader BA, Towler MR. Materials and techniques used in cranioplasty fixation: A review. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*. 2016;66:315–322. doi: 10.1016/j.msec.2016.04.101
 12. Zanotti B, Zingaretti N, Verlicchi A, et al. Cranioplasty: Review of Materials. *J Craniofac Surg*. 2016;27(8): 2061–2072. doi: 10.1097/SCS.0000000000003025
 13. Alkhaibary A, Alharbi A, Alnefaie N, et al. Cranioplasty: a comprehensive review of the history, materials, surgical aspects and complications. *World Neurosurgery*. 2020;139: 445–452. doi: 10.1016/j.wneu.2020.04.211
 14. Honeybul S, Morrison DA, Ho KM, et al. A randomised controlled trial comparing autologous cranioplasty with custom-made titanium cranioplasty: long-term follow-up. *Acta Neurochir (Wien)*. 2018;160(5):885–891. doi: 10.1007/s00701-018-3514-z
 15. Еолчиан С.А. Пластика сложных дефектов черепа имплантатами из титана и полиэтерэтеркетона (ПЕЕК), изготовленными по CAD/CAM технологиям // Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко. 2014. Т. 78, № 4. С. 3–13. [Yeolchiyan SA. Complex skull defects reconstruction with CAD/CAM titanium and polyetheretherketone (PEEK) implants. *Burdenko's journal of neurosurgery*. 2014;78(4):3–13. (In Russ).]
 16. Cheng AC, Wee AG. Reconstruction of cranial bone defects using alloplastic implants produced from a stereolithographically-generated cranial model. *Ann Acad Med Singap*. 1999;28(5):692–696.
 17. Ghai S, Sharma Y, Jain N, et al. Use of 3D-printing technologies in craniomaxillofacial surgery: a review. *Oral Maxillofac Surg*. 2018;22(3):249–259. doi: 10.1007/s10006-018-0704-z
 18. Nyberg EL, Farris AL, Hung BP, et al. 3D-Printing Technologies for Craniofacial Rehabilitation, Reconstruction, and Regeneration. *Ann Biomed Eng*. 2017;45(1): 45–57. doi: 10.1007/s10439-016-1668-5
 19. Winn HR. Youmans Neurological Surgery. Sixth Edition. Saunders, Philadelphia; 2011. 505 p.
 20. Prabhakar H, Zulfikar A, eds. Textbook of Neuroanesthesia and Neurocritical Care. Vol. I: Neuroanesthesia. Springer Nature; 2019. doi: 10.1007/978-981-13-3387-3
 21. Gopalakrishnan MS, Shanbhag NC, Shukla DP, et al. Complications of Decompressive Craniectomy. *Front Neurol*. 2018;9:977. doi: 10.3389/fneur.2018.00977
 22. Greenberg MS. Handbook of neurosurgery. Fifth edition. Thieme medical publishers, New York; 2001.

Информация об авторах

Воробьёв Алексей Николаевич [Alexey N. Vorobyev]; адрес: Россия, 107031, Москва, ул. Петровка, д. 25, стр. 2 [address: 25-2, Petrovka street, Moscow, 107031, Russia]; e-mail: avorobyev@fnkrr.ru, eLibrary SPIN: 3253-7996

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3742-6171>

Пряников Игорь Валентинович, д.м.н., профессор [Igor V. Pryanikov, Dr. Sci. (Med.), Professor]; e-mail: drpr@yandex.ru, eLibrary SPIN: 8551-2286

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3792-9107>

Яковлева Александра Витальевна [Alexandra V. Yakovleva]; e-mail: avyakovleva@fnkrr.ru, eLibrary SPIN: 3133-3281

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9903-7257>

Шайбак Александр Анатольевич [Alexandr A. Shaybak]; e-mail: shaybak@mail.ru, eLibrary SPIN: 8544-5407

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0087-1466>