

<https://doi.org/10.17116/neiro20198304134>

Индивидуальное предоперационное 3D-моделирование сосудистой патологии головного мозга

К.м.н. Д.Н. ОКИШЕВ^{1*}, к.м.н. А.Е. ПОДОПРИГОРА¹, д.м.н., проф. О.Б. БЕЛОУСОВА¹,
к.м.н. Ю.В. ПИЛИПЕНКО¹, д.м.н. О.Д. ШЕХТМАН¹, к.м.н. Н.В. ЛАСУНИН¹, к.м.н. А.Ю. БЕЛЯЕВ¹,
В.К. ПОШАТАЕВ¹, к.м.н. М.А. КУТИН¹, АН.Н. КОНОВАЛОВ¹, А.М. СПИРУ¹, к.м.н. Е.А. ОКИШЕВА²,
д.м.н., проф., член-корр. РАН Ш.Ш. ЭЛИАВА¹

¹ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко» Минздрава России, Москва;

²ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» (Сеченовский Университет) Минздрава России, Россия, Москва

Возможность сегментации трехмерных объектов по DICOM-сериям хорошо известна и доступна как на специализированных станциях, так и на персональных компьютерах. Методика сравнительно редко используется в клинической практике, и мы считаем, что польза предоперационной подготовки с использованием сегментированных 3D-моделей недооценивается.

Статья посвящена нашему опыту использования сегментации анатомических структур по КТ и МРТ для предоперационной подготовки к операциям, выполняющимся в нейрохирургических отделениях пациентам с сосудистой патологией. В работе рассмотрены виды и возможности сегментации, приведен ряд примеров клинического использования методики.

Ключевые слова: сегментация, анатомическое моделирование, хирургическая симуляция, быстрое прототипирование, 3D-печать.

Individual preoperative 3D modeling of vascular brain pathology

D.N. OKISHEV^{1*}, A.E. PODOPRIGORA¹, O.B. BELOUSOVA¹, YU.V. PILIPENKO¹, O.D. SHECHTMAN¹, N.V. LASUNIN¹,
A.YU. BELYAEV¹, V.K. POSHATAEV¹, M.A. KUTIN¹, AN.N. KONOVALOV¹, A.M. SPIRU¹, E.A. OKISHEVA², SH.SH. ELIABA¹

¹Burdenko Neurosurgical Center, Moscow, Russia;

²Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russia

The possibility of segmenting three-dimensional objects by DICOM-series is well known and available both on specialized workstations and on personal computers. The technique, however, is relatively rarely used in clinical practice, and we believe that the benefits of preoperative preparation using segmented 3D models are underestimated.

The article is devoted to our experience in using segmentation of anatomical structures based on CT and MRI for preoperative preparation for surgical operations performed in neurosurgical departments on patients with vascular pathology. The paper discusses the types and possibilities of segmentation, provides some examples describing the clinical use of the technique.

Keywords: segmentation, anatomical modeling, surgical simulation, rapid prototyping, 3D printing.

Список сокращений

АВМ — артериовенозная мальформация
АГ — ангиография
ВМА — верхняя мозжечковая артерия
ВСА — внутренняя сонная артерия
КТ — компьютерная томография
КТ-АГ — компьютерная томография в режиме ангиографии
МРТ — магнитно-резонансная томография
МРТ-АГ — магнитно-резонансная томография в режиме ангиографии
ПСА — передняя соединительная артерия
СМА — средняя мозговая артерия
ЭИКМА — экстра-интракраниальный микроанастомоз
3D — относящийся к позиционированию в трехмерном пространстве
DICOM — Digital Imaging and Communications in Medicine (отраслевой стандарт передачи и визуализации)
DLP — Digital Light Processing (цветовая светодиодная проекция, вариант технологии)
FDM — Fused deposition modeling (моделирование методом послойного наплавления)

FIESTA — Fast Imaging Employing Steady state Acquisition (MPT-последовательность)
MIP — Maximum intensity projection (метод визуализации воксельной информации)
PET-G — Polyethylene terephthalate glycol-modified (полиэтилентерефталат-гликоль)
PLA — Polylactic acid (полилактид)
PMMA — Polymethyl methacrylate (полиметилметакрилат)
SLA — Stereolithography (стереолитография)
SPGR — spoiled gradient-recalled acquisition in the steady state (MPT-последовательность)
T2 CUBE — название MPT-последовательности
TOF — time-of-flight (MPT-последовательность)
TRICKS/TWIST — Time-Resolved Imaging of Contrast KineticS/Time-resolved angiography With Stochastic Trajectories (MPT последовательности)
VPS — vinyl polysiloxane (винил полисилоксан, силикон)

В настоящее время существует большое количество нейрорентгенологических исследований, которые можно выполнить больному с сосудистой патологией, для того чтобы спланировать хирургическое вмешательство во всех деталях. Пользуясь различными возможностями КТ, МРТ и прямой АГ, можно полностью проанализировать сосудистую анатомию и анатомию доступа с учетом соотношения сосудов, мозговых и костных структур. Современные методы визуализации также имеют в своем арсенале способы определения толщины и плотности сосудистой стенки [1], расчета объемных характеристик кровотока с возможностью прогнозирования его изменения при выключении определенных сосудов [2]. Для хирурга, в отличие от рентгенолога, для планирования операции большое значение имеют взаимоотношения различных образований, которые на двухмерных томограммах часто сложно оценить. Эти взаимоотношения легче оценивать на 3D-модели. В настоящее время для создания 3D-моделей не требуется какого-либо специального оборудования, существует возможность восстанавливать изображения силами персонального компьютера.

Цель исследования — продемонстрировать наш опыт применения сегментации анатомических структур в клинической практике.

Общее представление о сегментации и ее применение

Последние несколько лет при подготовке к операциям мы используем сегментацию (выделение) объектов интереса по DICOM-сериям. Используемая нами методика предлагает полуавтоматическую воксельную и полигональную аппроксимацию различных анатомических образований. Конечная сцена представляет собой набор выбранных структур, позволяющий спланировать решение определенной хирургической задачи. Конечный результат сегментации значимо зависит как от качества исходных данных, так и от тщательности выделения объекта. Большим плюсом такого подхода является возможность создавать модели только из необходимых для решения задачи объектов, избавляя сцену от незначимого с точки зрения хирургии «рентгенологического шума». Крайне ценной является также возможность объединения образований, сегментированных из различных серий или даже исследований. Так, например, возможно создание сцены, где мягкие ткани, костные и сосудистые структуры будут сегментированы по КТ, мозговые — по последовательности МРТ без контраста, а объемное образование — по последовательности МРТ с контрастом. При этом, безусловно, очень важно максимально точно учитывать совмещение координат исследований.

Программное обеспечение и описание методики

В настоящее время для установки на персональный компьютер доступны как платные, так и бес-

платные программы, обладающие достаточным для сегментации функционалом: Materialise mimics (Бельгия), Osirix DICOM viewer (Швейцария), Inobitec DICOM viewer (Россия), Invesalius (Бразилия), Amira (Германия), 3Dslicer, Itk-SNAP, VuePACS3D, SpinFire Reader (США) и некоторые другие [3–8]. В связи с наличием быстрой доступной технической поддержки мы остановили выбор на программном продукте Inobitec. Первым этапом всегда проводилась полуавтоматическая воксельная аппроксимация объекта, затем в большинстве случаев вокруг воксельной 3D-модели генерировалась полигональная сетка. В зависимости от характера изначальных данных, выделение воксельного объекта могло проводиться по 3D-реконструкции с использованием подходящей цветовой таблицы, либо по предустановленному интервалу интенсивности/денсивности в режиме текущих плоскостей. В зависимости от ситуации и исходя из методики сегментации объекту либо оставляли цвет выбранной цветовой таблицы, либо присваивали уникальный для сцены цвет. При совмещении в одной сцене объектов из нескольких исследований предварительно выполнялось слияние серий с максимально возможным контролем точности сопоставления анатомических элементов. Окончательная сцена просматривалась либо в окне 3D-вида самого Inobitec DICOM viewer, либо полигональные объекты экспортировались в Stanford Polygon File Format (.ply) для последующего формирования сцены во внешних программах. Мы использовали два бесплатных программных продукта: Autodesk Meshmixer и Blender. Данная опция была нужна для использования определенных возможностей этих программ при просмотре: вариабельной прозрачности объектов, шаговой навигации по сцене и др.

Примеры клинического использования

Использование простых воксельных 3D-моделей

Во многих используемых на практике для просмотра снимков программах имеется возможность создания воксельной 3D-модели какой-либо структуры по заданным характеристикам денсивности и интенсивности [3]. Таким образом обычно оценивают объекты высокой плотности/интенсивности: кости и сосуды, хотя использование соответствующей цветовой таблицы позволяет, например, выполнить реконструкцию интракраниальных сосудов по сигналу низкой интенсивности в режиме 3D T2. Создание воксельной 3D-модели по представленной КТ-АГ или МРТ-АГ серии занимает несколько секунд. К настоящему моменту можно говорить о том, что воксельные 3D-модели используются при просмотре снимков больного с сосудистой патологией рутинно как на этапе постановки диагноза, так и на этапе планирования хирургического вмешательства (рис. 1).

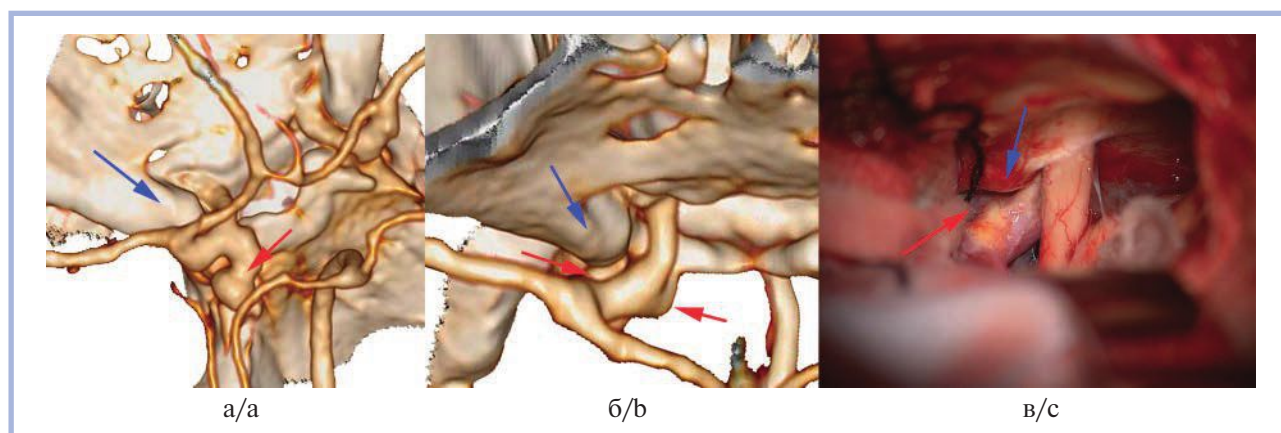


Рис. 1. Воксельная 3D-модель КТ-АГ. Стандартная цветовая таблица.

а — аневризма супраклиноидного сегмента левой внутренней сонной артерии; б — соотношение костных и сосудистых структур позволяет предположить, что для микрохирургического клипирования аневризмы необходимо удаление переднего наклоненного отростка; в — интраоперационный вид, необходимость клиноидэктомии очевидна.

Красные стрелки — аневризма, синие стрелки — передний наклоненный отросток.

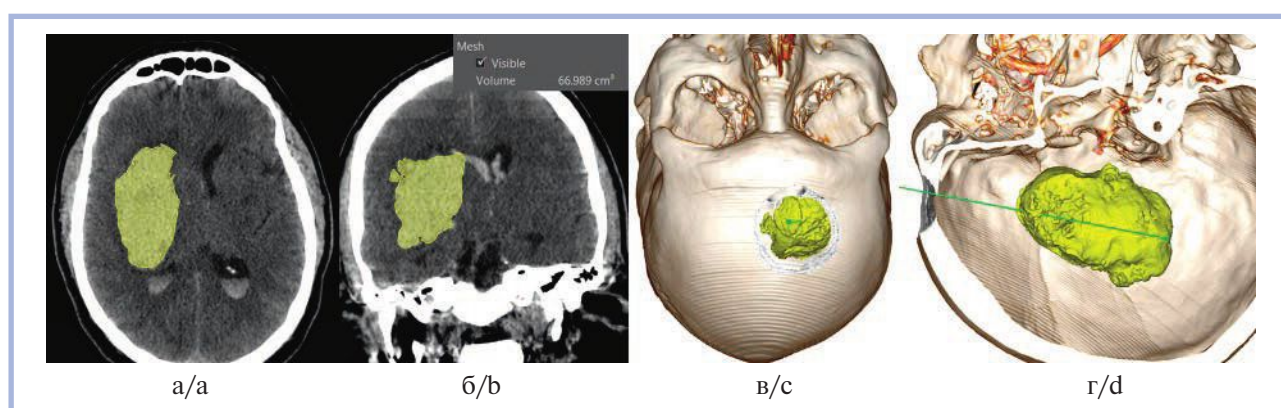


Рис. 2. Кровоизлияние с формированием внутримозговой гематомы с прорывом в желудочковую систему.

а, б — результат полуавтоматической сегментации внутримозгового компонента по высокой плотности. Автоматический подсчет объема сегментированной фигуры — ~67 мл; в, г — предполагаемая траектория для планируемого эндоскопического опорожнения гематомы по ее длиннику.

Оценка объема образования сложной формы

Оценка объема патологического образования в нейрохирургии имеет решающее, а порой критическое значение для выбора тактики лечения. Так, часто требуется измерение объема гематомы для определения показаний к операции и отслеживания эффекта проводимых мероприятий, например при ее дренировании, оценка изменения объема опухоли для решения вопроса об операции и т.д. Сегментация образования естественным образом решает этот вопрос, так как замкнутая полигональная фигура имеет определенные площадь и объем (рис. 2). Сегментация гиперденсивной гематомы занимает несколько секунд, точность результата такого расчета многократно превышает оценку, выполненную вручную. Наложение двух объемных фигур друг на друга может дать хирургически значимую информацию об изменении структуры образования. При динамической оценке следует добиваться максимального сопоставления параметров исследований и сегментации.

Сегментация черепно-мозговых нервов

Хирург во время манипуляций на сосудах основания мозга и мостомозжечкового угла часто вынужден рассчитывать доступ таким образом, чтобы минимально травмировать черепно-мозговые нервы, отделять от них сосуды и аневризму, порой — в условиях грубого спаечного процесса. Так, например, положение параклиноидной аневризмы относительно зрительных нервов, хиазмы и костных структур необходимо детально представлять для того, чтобы спланировать ее микрохирургическое выключение, либо в ряде случаев признать невозможность его безопасного проведения. Самым актуальным исследованием для построения 3D-модели сосудов основания черепа с прилежащими костными структурами в настоящее время считается КТ-АГ. Выполнение двух спиральных серий до болюсного введения контраста и во время него позволяет легко добиться отдельной визуализации сосудов и костных элементов. Многие специалисты по МРТ считают, что визуализацию не-

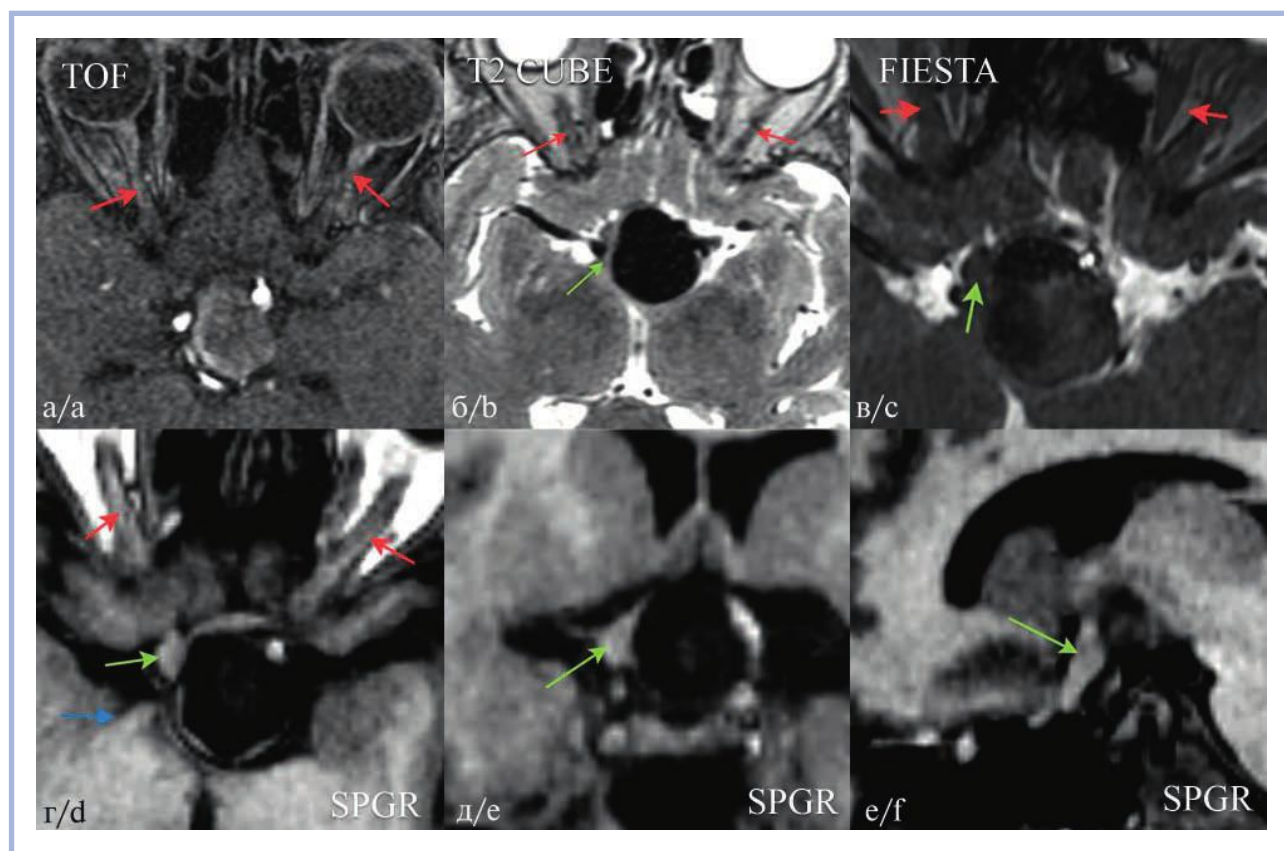


Рис. 3. Аневризма левой ВСА параклиноидной локализации.

Сравнение МРТ в различных режимах для сегментации хиазмы и зрительного нерва (красные стрелки — зрительные нервы, зеленые стрелки — хиазма, голубая стрелка — зрительный тракт).

а — МРТ в режиме 3D TOF: различимы только нервы на интраорбитальном участке; б — МРТ в режиме T2 CUBE: нервы и хиазму невозможно дифференцировать от мозгового вещества; в — МРТ в режиме FIESTA: нервы сложно дифференцировать как с мозговым веществом, так и с аневризмой; г, д, е — МРТ в режиме 3D T1 FSPGR: нервы дифференцируются и от аневризмы, и от ткани мозга, можно выполнить сегментацию.

рвов наиболее удобно выполнять в режиме FIESTA. Наш опыт показал, что в условиях измененной анатомии вследствие смещения нервов мешком аневризмы FIESTA не позволяет качественно сегментировать зрительный нерв, дифференцировать его от основания лобной доли, а порой и от самой аневризмы, так как вследствие турбулентного кровотока в аневризме интенсивность сигнала от нерва и аневризмы может быть неотличима. Сравнительный анализ режимов 3D TOF, T2 CUBE, FIESTA и 3D SPGR показал преимущество последнего для сегментации смещенного зрительного нерва и хиазмы (рис. 3, 4). В режиме T1 SPGR нерв выглядит более интенсивным по сравнению с базальными отделами лобной доли. Нерв также значительно отличается от аневризмы и сосудов. Введение контраста мешает сегментации нерва за счет остаточного контрастирования оболочек и небольших сосудов.

Полезную дополнительную информацию для планирования операции можно получить при сегментации области нейроваскулярного конфликта. Сегментировать эту область по FIESTA часто затруднительно, так как интенсивность сосуда и нерва ча-

сто сопоставима. Наш опыт показывает, что создание 3D-модели удобно проводить, имея серию 3D TOF, на которой ствол ВМА достаточно хорошо виден в дистальном направлении, и 3D SPGR, которая позволяет легко сегментировать тройничный и лицевой нервы, а также поверхность ствола мозга. Для дистальной визуализации ВМА в ряде случаев можно выполнять 3D TOF с контрастным усилением, при проведении 3D SPGR введение контраста, напротив, нежелательно, так как это значительно затруднит сегментацию нервов. Использование для сегментации и сосудистых и нервных структур одной и той же модальности (МРТ) необходимо для максимально точного сопоставления серий, что крайне важно при данной патологии. При наличии КТ-АГ можно также добавить в сцену костные структуры и полностью смоделировать доступ (рис. 5).

Сегментация коры и конвекситальных вен для точного расчета энцефалотомии при поиске и удалении небольших объемных образований

При поиске и удалении ряда внутримозговых образований четкие анатомические ориентиры гораз-

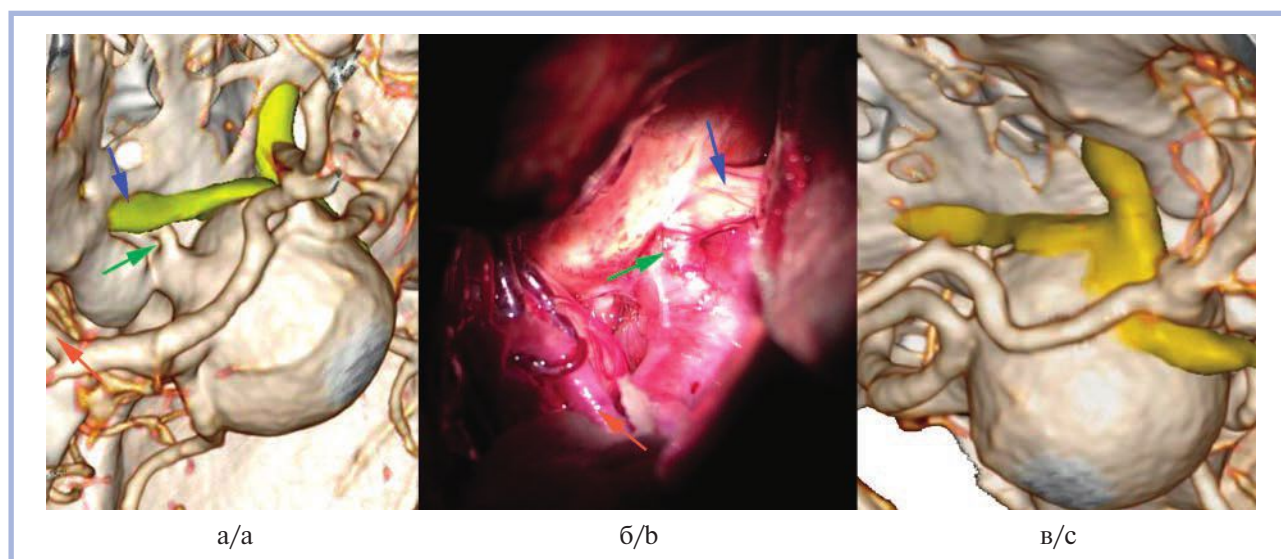


Рис. 4. Крупная параклиноидная аневризма левой ВСА медиального расположения.

КТ-АГ с наложением сегментированных по MPT 3D SPGR хиазмы и зрительных нервов (красные стрелки —, синие стрелки — зрительный нерв, зеленые стрелки — устье *a. ophthalmica*).

а — 3D-реконструкция слева; б — интраоперационный вид; в — реконструкция справа: хиазма истончена и частично не сегментируется.

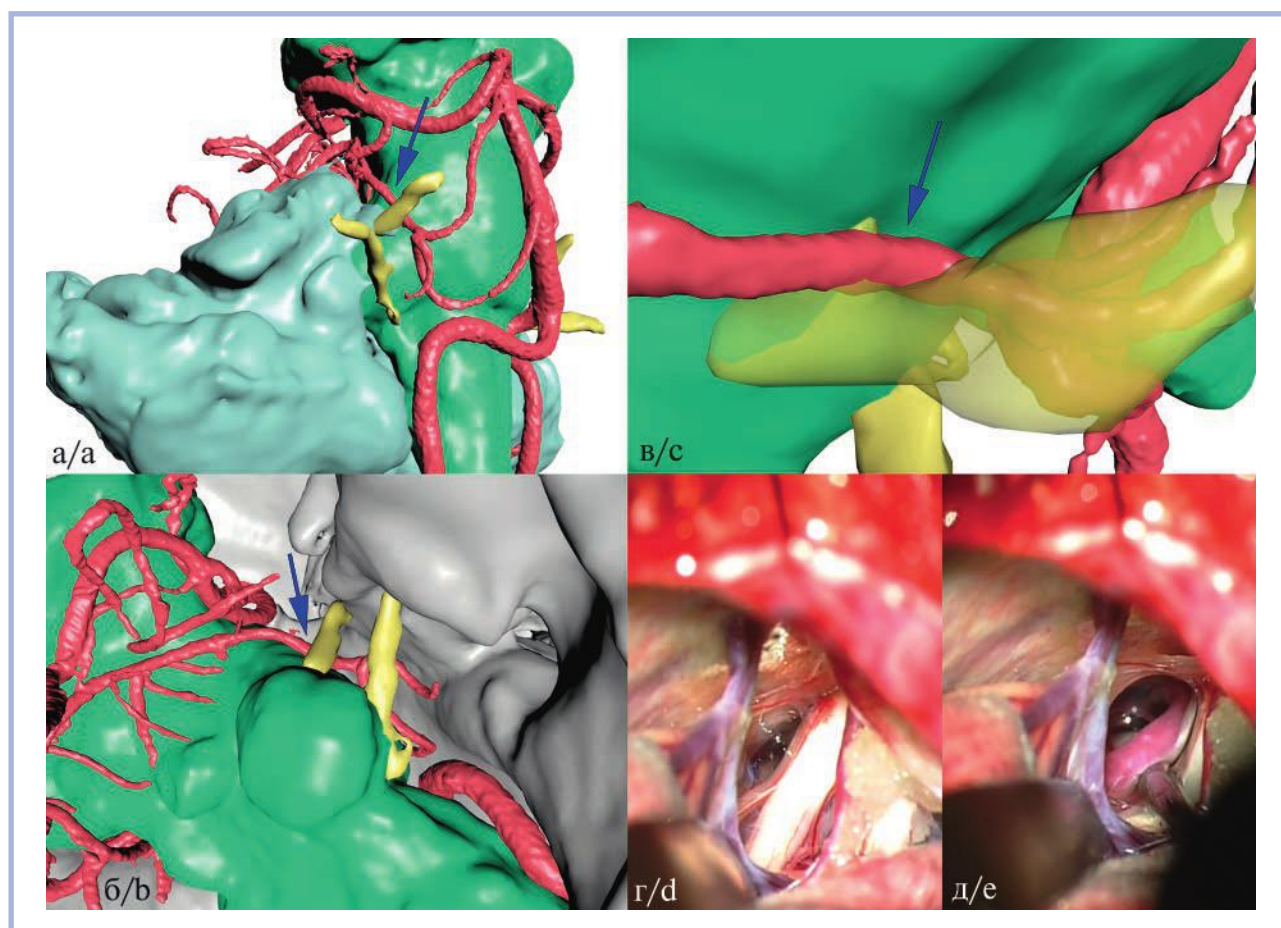


Рис. 5. Сегментация области нейроваскулярного конфликта справа.

Стрелками указана ВМА, компримирующая тройничный нерв. Костные структуры сегментированы по КТ-АГ, поверхность ствола и нервы сегментированы по T1 SPGR, сосуды — по 3D TOF.

а — сегментированы ствол, мозжечок, нервы, сосуды; б — в сцену добавлены костные структуры из послеоперационного КТ; в — реконструкция конфликта, визуализируется деформация тройничного нерва по передней поверхности; г — интраоперационное фото: визуализирован тройничный нерв; д — интраоперационное фото: ВМА прилегает к нерву спереди.

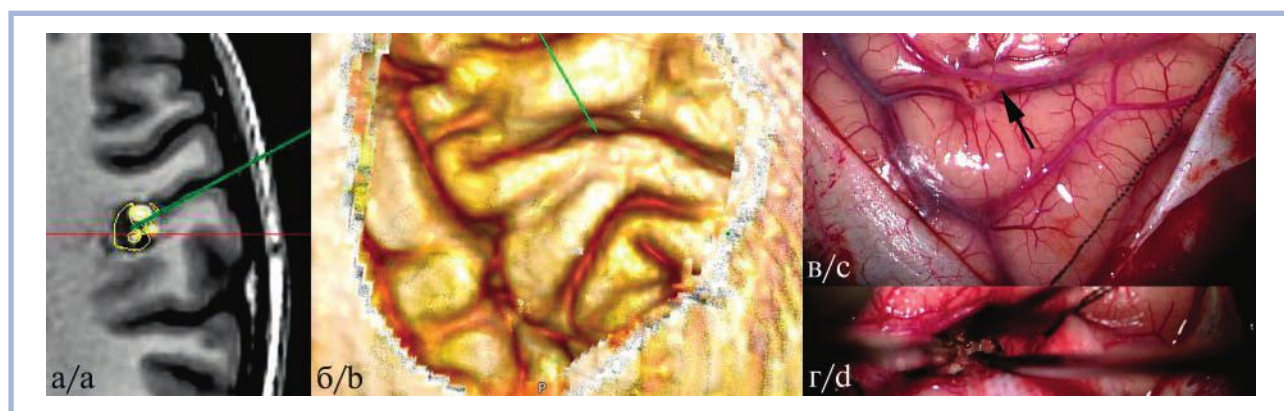


Рис. 6. Доступ к небольшой кавернومه левой лобной доли через борозду, найденную по 3D-реконструкции коры.

а — сегментация каверномы по 3D T1; б — воксельная 3D-модель поверхности коры над каверномой (зеленая линия — предполагаемая траектория доступа); в — на интраоперационном фото хорошо различим искомый рисунок извилин, намечено место энцефалотомии (стрелка); г — интраоперационное фото: осуществлен точный доступ к кавернومه через борозду.

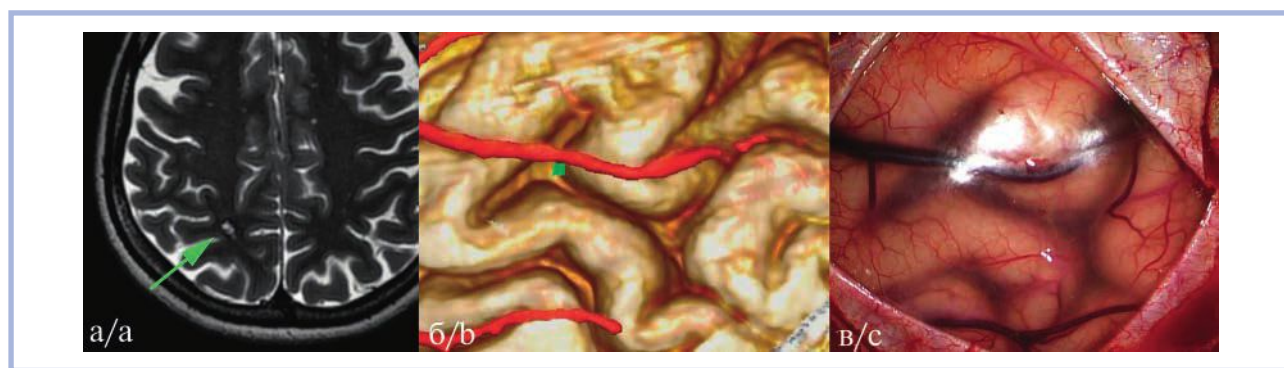


Рис. 7. Реконструкция коры с конвекситальными венами над областью расположения каверномы правой теменной доли.

а — T2 МРТ: кавернома указана стрелкой через ближайшую к ней борозду; б — воксельная 3D-модель поверхности коры: сегментированные вены (красного цвета), зеленый маркер — предполагаемое место энцефалотомии через указанную борозду; в — интраоперационное фото: структуры легко идентифицируются.

до эффективнее любой аппаратной нейронавигации, так как последняя может быть неточной из-за интраоперационных смещений. Для поиска и транскортикального удаления небольших сосудистых образований, в частности периферических аневризм и каверном, в последнее время мы часто ориентируемся по воксельной 3D-реконструкции коры мозга. С использованием стандартной цветовой таблицы воксельная реконструкция коры легко выполнима по 3D T1 или 3D T2 FLAIR последовательностям (**рис. 6**). Ориентации также существенно помогает наложение на кору полигональной модели поверхностных вен, которую легко восстановить по T1 с контрастным усилением, либо по 3D TOF-венографии (**рис. 7**).

Сегментация частично тромбированных аневризм

Тактика микрохирургического выключения частично тромбированных аневризм значительно отличается от тактики при полностью функционирующих аневризмах. При анализе снимков частично тромбированных аневризм абсолютно необходимо четко представить размеры и взаиморасположение тромбированной и функционирующей частей. Выключе-

ние такой аневризмы часто невозможно без предварительной тромбэкстракции, которую при наличии необходимой информации можно достаточно полно и безопасно выполнить на функционирующих сосудах. Сокращение общего времени выключения несущих артерий снижает риск послеоперационных ишемических осложнений и ускоряет операцию. Следует отметить, что при крупных и гигантских аневризмах часто наблюдается псевдотуморозный тип течения заболевания, следовательно, удаление тромбированного объема является самостоятельной задачей операции. Оптимальной методикой для сегментации функционирующей части аневризмы является КТ-АГ. Сегментация полного объема аневризмы возможна с определенной погрешностью по бесконтрастной КТ (**рис. 8**), однако наиболее точно ее можно выполнить по одной из 3D МРТ-последовательностей, при этом предпочтителен T2-режим.

Сегментация для планирования иссечения АВМ

Сосудистая архитектура АВМ часто достаточно сложна и индивидуальна. При планировании микрохирургического удаления АВМ необходимо четко

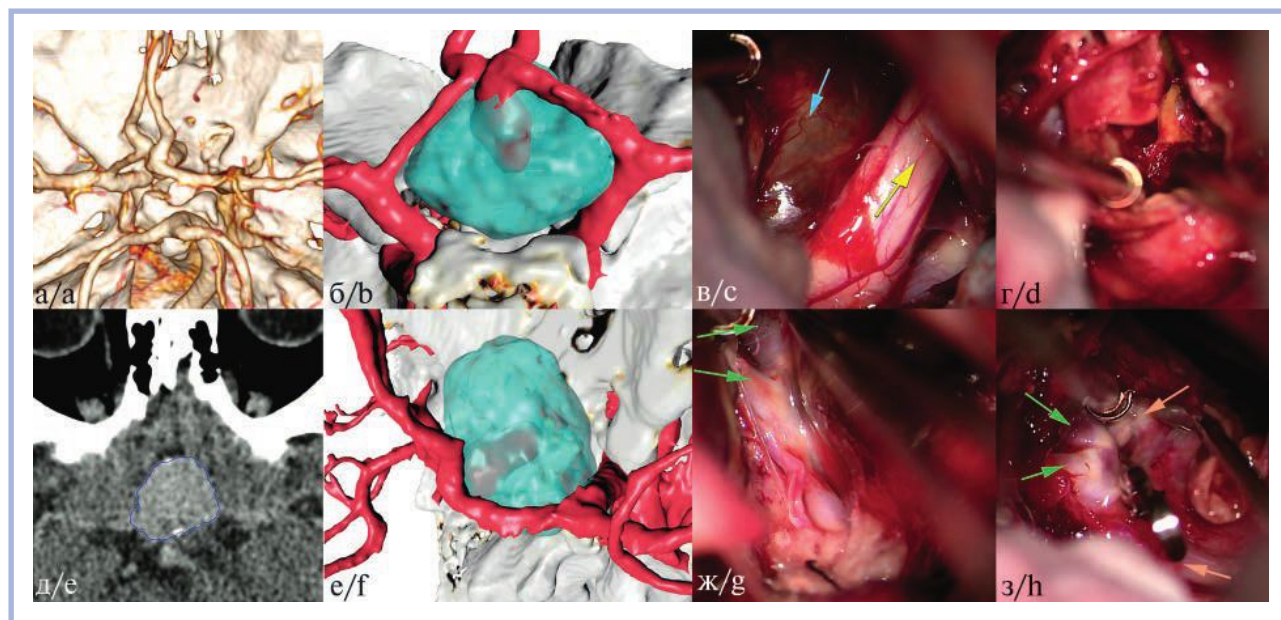


Рис. 8. Сегментация крупной частично тромбированной аневризмы ПСА по КТ-АГ.

а — воксельная 3D-модель по стандартной цветовой таблице не позволяет оценить истинную интраоперационную ситуацию, не визуализируется тромбированная часть аневризмы; б — сегментирован весь объем аневризмы по гиперденсивному сигналу; в, г — сцена, состоящая из полигональных 3D-моделей (в — вид сзади, г — вид справа): тромбированная часть аневризмы отображена полупрозрачным бирюзовым цветом, сквозь нее видна функционирующая часть; д, е, ж, з — интраоперационные фото: желтая стрелка — зрительный нерв, голубая стрелка — тромбированное тело аневризмы, зеленые стрелки — А2-сегменты ПМА, оранжевые стрелки — А1-сегменты ПМА; д — визуализирован мешок крупной аневризмы, значительных размеров; е — А2 сегменты удалось визуализировать после отведения тела аневризмы, как и предполагалось при изучении 3D-модели; ж — тромбэктомия из вскрытого тела аневризмы ультразвуковым аспиратором; з — тело аневризмы полностью опорожнено, клипирована шейка аневризмы.

представлять быстрый и безопасный доступ к основным афферентным сосудам, уметь дифференцировать их от нормальных артерий, заранее определиться с минимальным достаточным объемом кортикальной резекции. На текущий момент прямая АГ считается полезным, но недостаточным исследованием для планирования микрохирургического иссечения АВМ. Основным плюсом прямой АГ — наличие развертки прохождения контраста по времени и, как следствие, возможность дифференцировать артерии и вены. Однако в настоящее время снимки с разрешением по времени уже можно сделать и на МСКТ, и на МРТ (режимы TRICKS/TWIST). Детализация таких снимков ничем не уступает данным прямой АГ. При этом локализацию АВМ прямой АГ часто приходится определять исходя из ее расположения относительно костных структур и крупных сосудов. На томограмме локализация АВМ относительно структур мозга и гематомы видна детально. Первичными исследованиями для больных с подозрением на сосудистую патологию являются КТ-АГ и МРТ-АГ в режиме 3D TOF. Наш опыт показывает, что подробное изучение этих снимков часто позволяет дифференцировать афферентные, эфферентные и нормальные сосуды. При их отдельной сегментации получается гораздо более информативная модель, чем при прямой АГ. Одновременная сегментация коры мозга по МРТ позволяет уточнить достаточную энцефалотомию, а сегментация костных структур по КТ —

запланировать минимальную достаточную краниотомию (рис. 9).

Сегментация для планирования реваскуляризирующих операций

Создание экстра-интракраниальных микро- и широкопросветных анастомозов требует тщательного соблюдения длины перемещаемых ветвей и графтов с учетом анатомии мозговых и костных структур. Тромбоз перерастянутой или перегнутой в петле ветви — достаточно часто встречающееся осложнение. Анализ 3D-моделей помогает правильно подготовить артерию-донор, предположить ее необходимую длину, выбрать реципиентный сосуд и место анастомоза, учесть формирование изгибов в соответствии с особенностями анатомических структур по ходу сосуда (рис. 10).

Сегментация для реконструктивного моделирования

В реконструктивной костной хирургии используется сегментация костного дефекта для последующего моделирования имплантата [9, 10]. Для пациентов с сосудистой патологией костная реконструкция актуальна после проведения декомпрессивных резекционных трепанаций черепа после тяжелых кровоизлияний. Используемое нами программное обеспечение позволяет не только с легкостью сегментировать имеющийся дефект, но и смоделировать дефект в ситуации, когда больному только

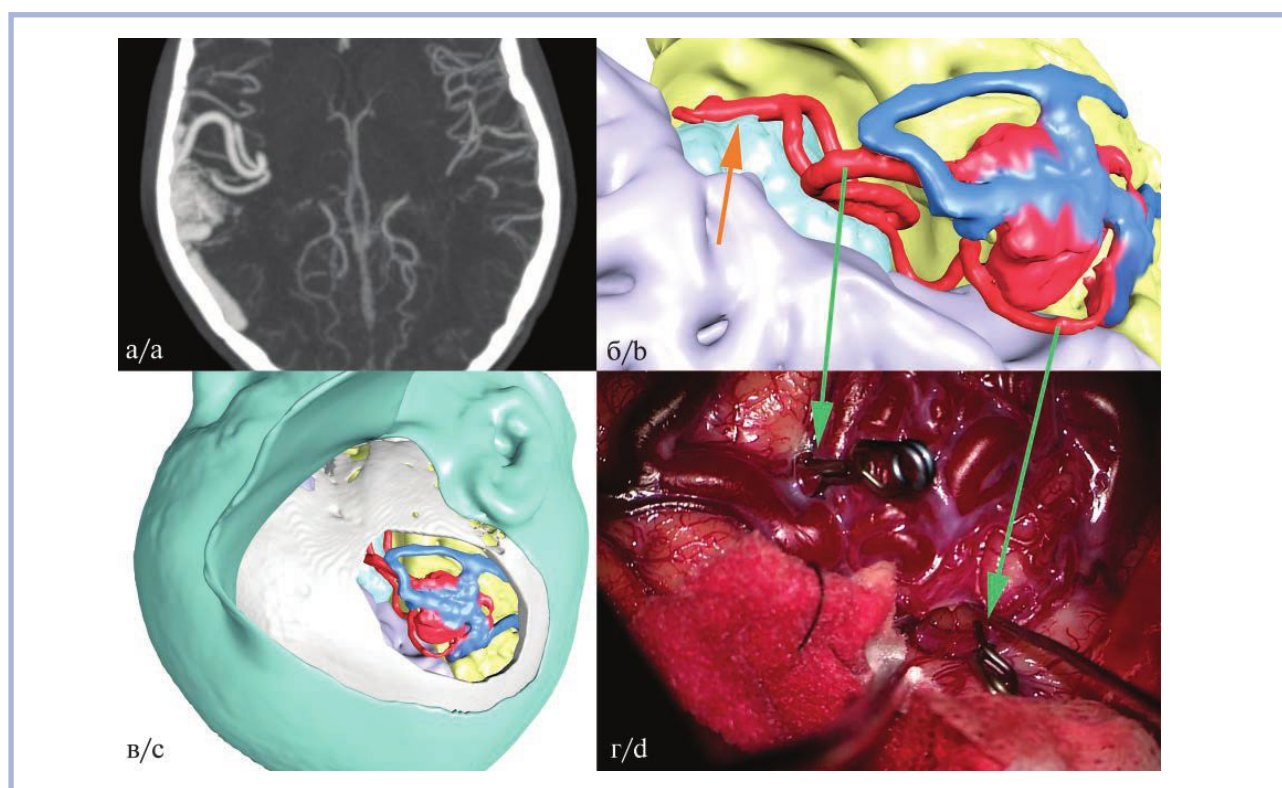


Рис. 9. Сегментация АВМ правой височной доли по КТ-АГ (мягкие ткани, череп, эфференты) и МРТ (афференты, клубок АВМ, вещество мозга).

а — МIP КТ-АГ; б, в — сегментированный доступ. Смоделированы отведенная кожа, костный доступ, отведение лобной доли; г — интраоперационная картина. Зеленые стрелки указывают на оба клипированных крупных афферентных сосуда, оранжевая стрелка — на М1-сегмент СМА.

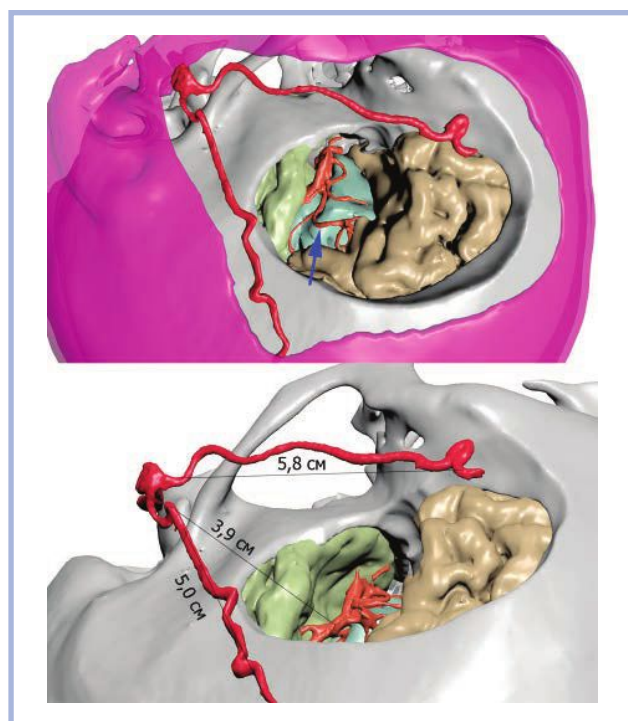


Рис. 10. Планирование создания ЭИКМА. Сегментация по КТ-АГ интракраниальных сосудов, поверхностной височной артерии, костей черепа, мягких тканей.

Сегментация по МРТ лобной, височной и островковой долей. Смоделировано разделение лобной и височной долей мозга. Стрелка указывает на реципиент — крупную М3 ветвь СМА, удобно расположенную для создания анастомоза.

планируется первичная или дополнительная резекция костных структур. Таким образом, к моменту завершения операции создается индивидуальный имплантат в соответствии с имеющимся дефектом. Для этого необходимо создание 3D-модели с планируемой резекцией и моделирование трафарета для выполнения нужного распила, а также имплантата или пресс-формы для интраоперационного формирования имплантата. Особенностью такого лоскута из РММА будет являться сложность полной установки его «на рельеф» в месте резекции по трафарету, так как микронеровности рельефа и небольшие изменения угла распила сложно предсказать. Устойчивость и герметичность края в такой ситуации логично осуществлять накладками на костный край, соблюдая необходимую толщину, обеспечивающую прочность лоскута. Такой подход можно использовать в следующих ситуациях: неподходящая для основного этапа (клипирование аневризмы, иссечение АВМ) выполненная ранее резекционная трепанация после удаления гематомы (рис. 11), необходимость резекции кости при гиперостотических менингиомах, необходимость большой резекционной трепанации у пожилых пациентов, операция по краниопластике дефекта черепа после частичного лизиса аутокости после предыдущей пластики. Отметим, что в настоящий момент мы полностью отказались от краниопластики стерилизованной аутокостью [11].

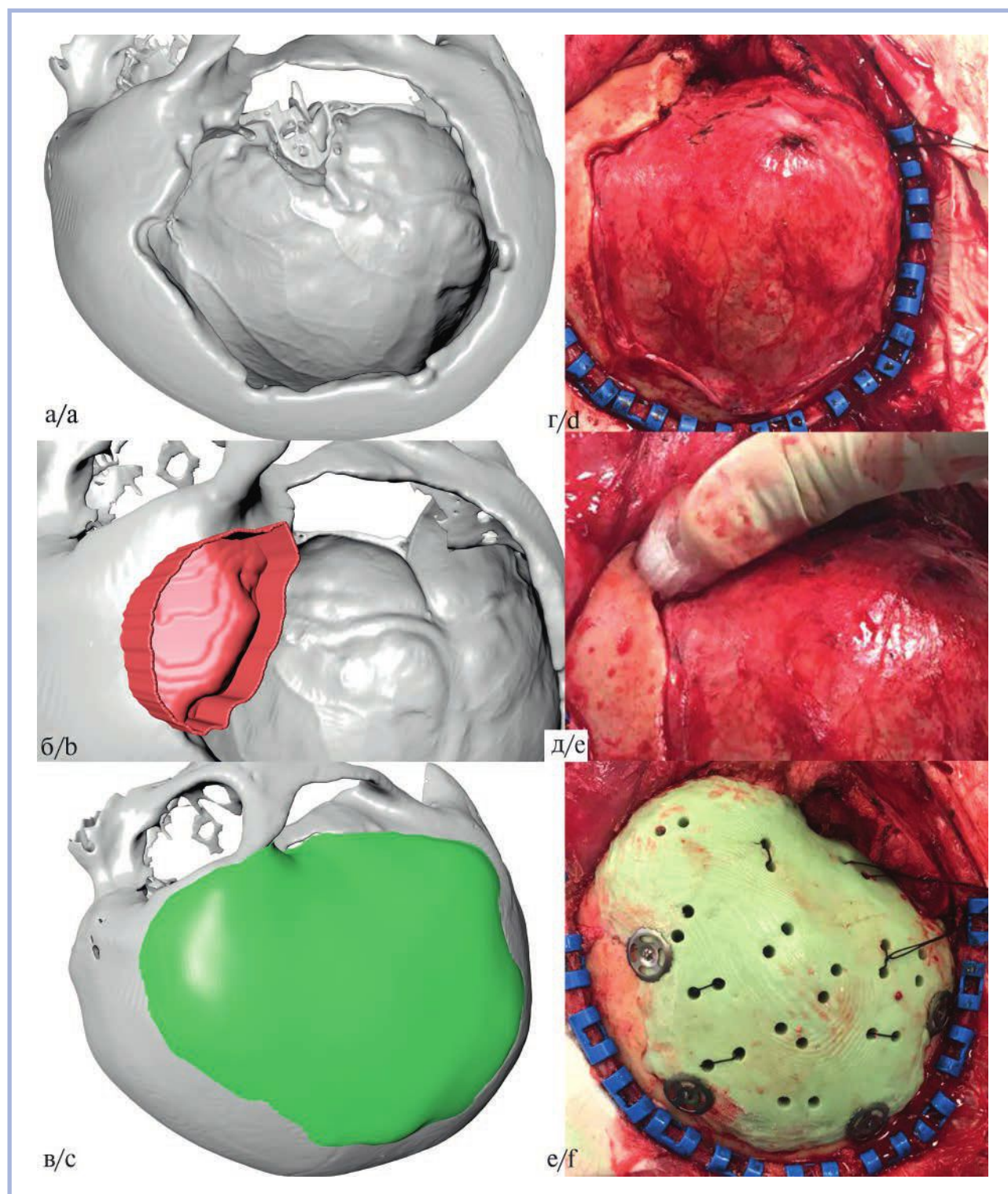


Рис. 11. Сегментация для «трафаретной» краниопластики после клипирования аневризмы.

Пациентка оперирована по месту жительства, удалена внутримозговая гематома объемом 70 мл, выполнена декомпрессивная краниоэктомия (а). После стабилизации состояния при обследовании выявлена аневризма бифуркации правой СМА. Для клипирования аневризмы с последующей моделируемой пресс-формами краниопластикой выполнено выпиливание необходимого участка кости по трафарету (б), смоделирован имплантат и пресс-формы для его формирования (в); г — интраоперационное фото после отведения мягких тканей; д — трафарет установлен на рельеф костного края для выполнения запланированной резекции вокруг накладке; е — спрессован и установлен индивидуальный костный имплантат из РММА, контуром обозначена часть имплантата, смоделированная на основании 3D-модели с запланированной резекцией.



Рис. 12. Модели, сегментированные и распечатанные на бытовом FDM 3D-принтере в НМИЦ нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко.

а, б — модель аневризмы (стрелки) правой ВСА со структурами основания, по КТ-АГ, PLA; в, г — прототип тренажера для создания микроанастомозов в Sylvian fissure, по КТ и МРТ: плотные костные структуры — PET-G, мягкие мозговые структуры — VPS.

Сегментация для 3D-печати

3D-печать может стать важным элементом в предоперационной подготовке и обучении [12]. Все, что можно сегментировать в сплошную полигональную модель, можно напечатать. Так, можно создавать простые и составные печатные макеты, печатать с использованием материалов различных цветов и свойств, либо печатать формы для дублирования вторичными материалами [6—8, 13—15]. К началу 2019 г. появилось большое количество доступных FDM и SLA/DLP 3D-принтеров, в том числе отечественного производства. Отметим, что для печати сложных анатомических моделей необходимо как минимум использование двух экструдеров и растворимых поддержек, но цена на такие принтеры в сборе высока. Простые модели вполне реально воспроизводить на FDM-принтере с одним экструдером, что дешевле (рис. 12). Возвращаясь к теме реконструктивного моделирования, следует отметить, что аддитивное производство непосредственно при клинике уже давно используется в стоматологии: разработано множество биосовместимых полимеров для печати зубных протезов, хирургических шаблонов, мостов и коронок, ортезов и элайнеров. Нет ни существен-

ных технических, ни юридических преград к созданию аналогичных «нейротехнических» лабораторий. Нейрохирургическое аддитивное производство уже существует в ряде стран [16, 17]. В нескольких нейрохирургических отделениях России также для различных целей закуплены 3D-принтеры, и, судя по всему, в скором времени следует ожидать создания лабораторий аддитивного производства при крупных нейрохирургических отделениях и центрах.

Заключение

Наш опыт сегментации различных образований по DICOM-сериям показал, что это доступная технология с большими возможностями. Существует большое количество программ, поддерживающих возможность сегментации. Создаваемые модели могут быть использованы для самых различных целей. Создание индивидуальных 3D-моделей для подготовки к операции уже сейчас активно используется в ряде областей нейрохирургии. Реализовать печать сегментированных объектов можно даже при небольшом отделении без больших финансовых вложений.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Song JW, Rafta SD, Obusez EC, Raymond SB, Gurol EM, Schaefer PW, Romero JM. High resolution vessel wall MR imaging in prestenotic intracranial atherosclerotic disease. *J Clin Neurosci*. 2019 Jan 22;S0967-5868(18):31575-31573. [Epub ahead of print]. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2019.01.008>
2. Anderegg L, Amin-Hanjani S, El-Koussy M, Verma RK, Yuki K, Schoeni D, Hsieh K, Gralla J, Schroth G, Beck J, Raabe A, Arnold M, Reinert M, Andres RH. Quantitative magnetic resonance angiography as a potential predictor for cerebral hyperperfusion syndrome: a preliminary study. *J Neurosurg*. 2018 Apr;128(4):1006-1014. Epub 2017 Apr 14. <https://doi.org/10.3171/2016.11.JNS161033>
3. Spiriev T, Nakov V, Laleva L, Tzekov C. OsiriX software as a preoperative planning tool in cranial neurosurgery: A step-by-step guide for neurosurgical residents. *Surg Neurol Int*. 2017 Oct 10;8:241. eCollection 2017. https://doi.org/10.4103/sni.sni_419_16

4. Dale AM, Fischl B, Sereno MI. Cortical surface-based analysis. I. Segmentation and surface reconstruction. *Neuroimage*. 1999 Feb;9(2):179–194. <https://doi.org/10.1006/nimg.1998.0395>
5. Rengier F, Mehndiratta A, von Tengg-Kobligh H, Zechmann CM, Unterhinninghofen R, Kauczor HU, Giesel FL. 3D printing based on imaging data: review of medical applications. *Int J Comput Assist Radiol Surg*. 2010 Jul; 5(4):335–341. <https://doi.org/10.1007/s11548-010-0476-x>
6. Ploch CC, Mansi CSSA, Jayamohan J, Kuhl E. Using 3D Printing to Create Personalized Brain Models for Neurosurgical Training and Preoperative Planning. *World Neurosurg*. 2016 Jun;90:668–674. Epub 2016 Feb 24. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2016.02.081>
7. Wurm G, Lehner M, Tomancok B, Kleiser R, Nussbaumer K. Cerebrovascular biomodeling for aneurysm surgery: simulation-based training by means of rapid prototyping technologies. *Surg Innov*. 2011 Sep;18(3):294–306. Epub 2011 Feb 8. <https://doi.org/10.1177/1553350610395031>
8. Mashiko T, Otani K, Kawano R, Konno T, Kaneko N, Ito Y, Watanabe E. Development of three-dimensional hollow elastic model for cerebral aneurysm clipping simulation enabling rapid and low cost prototyping. *World Neurosurg*. 2015 Mar;83(3):351–361. Epub 2013 Oct 16. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2013.10.032>
9. Коновалов А.Н., Потапов А.А., Лихтерман Л.Б., Корниенко В.Н., Кравчук А.Д., Охлопков А.В., Захарова Н.Е., Яковлев С.Б. *Реконструктивная и минимально инвазивная хирургия последствий черепно-мозговой травмы*. М.: Издательство ИП Т.А. Алексеева, 2012;320. Konovalov AN, Potapov AA, Likhtermann LB, Kornienko VN, Kravchuk AD, Okhlopov AV, Zakharova NE, Yakovlev SB. *Rekonstruktivnaya i minimal'no invazivnaya khirurgiya posledstviy cherepno-mozgovoy travmy*. M.: Izdatel'stvo IP T.A. Alekseeva, 2012;320. (In Russ.).
10. Kravchuk A, Potapov A, Kornienko V, Eropkin S, Panchenko V, Evseev A, Stuchilov V. *Computed modeling in reconstructive surgery for posttraumatic skull vault bone defects*. *Neurotrauma*. Eds. Potapov A, Likhtermann L, KRH von Wild. 2002;187–190.
11. 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. *Журнал «Вопросы нейрохирургии» имени Н.Н. Бурденко*. 2018;82(5):88–95.
- Konovalov AN, Pilipenko YV, Eliava ShSh. Technical features and complications of cranioplasty in patients after decompressive craniectomy in the acute period of subarachnoid hemorrhage. *Zh Vopr Neurokhir im NN Burdenko*. 2018;82(5):88–95. (In Russ.). <https://doi.org/10.17116/neiro20188205188>
12. Кравчук А.Д., Потапов А.А., Панченко В.Я., Комлев В.С., Новиков М.М., Охлопков В.А., Маряхин А.Д., Дувидзон В.Г., Латышев Я.А., Чёлушкин Д.М., Чобулов С.А., Александров А.П., Шкарубо А.Н. Аддитивные технологии в нейрохирургии. *Журнал «Вопросы нейрохирургии» им. Н.Н. Бурденко*. 2018;82(6):97–104. Kravchuk AD, Potapov AA, Panchenko VY, Komlev VS, Novikov MM, Okhlopov VA, Maryakhin AD, Duvidzon VG, Latyshev YaA, Chelushkin DM, Chobulov SA, Aleksandrov AP, Shkarubo AN. Additive technologies in neurosurgery. *Zh Vopr Neurokhir im N N Burdenko*. 2018;82(6):97–104. (In Russ.). <https://doi.org/10.17116/neiro20188206197>
13. Ryan JR, Almeyty KK, Nakaji P, Frakes DH. Cerebral Aneurysm Clipping Surgery Simulation Using Patient-Specific 3D-Printing and Silicone Casting. *World Neurosurg*. 2016 Apr;88:175–181. Epub 2016 Jan 22. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2015.12.102>
14. Lan Q, Chen A, Zhang T, Li G, Zhu Q, Fan X, Ma C, Xu T. Development of Three-Dimensional Printed Craniocerebral Models for Simulated Neurosurgery. *World Neurosurg*. 2016 Jul;91:434–442. Epub 2016 Apr 27. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2016.04.069>
15. Russ M, O'Hara R, Setlur Nagesh SV, et al. Treatment Planning for Image-Guided Neuro-Vascular Interventions Using Patient-Specific 3D Printed Phantoms. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng*. 2015;9417:941726. <https://doi.org/10.1117/12.2081997>
16. Unterhofer C, Wipplinger C, Verius M, Recheis W, Thomé C, Ortler M. Reconstruction of large cranial defects with poly-methyl-methacrylate (PMMA) using a rapid prototyping model and a new technique for intraoperative implant modeling. *Neurol Neurochir Pol*. 2017 May-Jun;51(3):214–220. Epub 2017 Mar 10. <https://doi.org/10.1016/j.pjnns.2017.02.007>
17. Hay JA, Smayra T, Moussa R. Customized polymethylmethacrylate cranioplasty implants using 3D-printed polylactic acid molds: Technical note with 2 illustrative cases. *World Neurosurgery*. 2017. Sep;105:971–979. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.05.007>

Поступила 04.03.19
Received 04.03.19

Комментарий

Статья посвящена одной из наиболее актуальных тем в нейровизуализации — возможности построения 3D-моделей, наиболее точно отражающих анатомические особенности выбранной области и достаточно демонстративных для планирования нейрохирургом тактики операции. Существующее сегодня программное обеспечение доступно для использования в рутинной практике и должно быть освоено врачами-рентгенологами и нейрохирургами.

В последующих работах для более ясного ознакомления с преимуществами моделирования, возможно, стоит

отдельно рассматривать построение 3D-моделей на основе сегментации и вопросы создания имплантатов, в том числе для 3D-печати.

Интересно было бы ознакомиться с опытом авторов по использованию 3D-моделей у пациентов с опухолями основания черепа либо аневризмами базилярной артерии.

Авторы подчеркивают клиническое значение 3D-моделирования, но следует также указать, что тема не менее актуальна для формирования учебных пособий, математической обработки построенных моделей и отработки навыков нейрохирургов в симуляционных центрах.

Е.В. Григорьева (Москва)

ПЕРВЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ КАНАЛ

ОНЛАЙН ТЕЛЕВИДЕНИЕ ДЛЯ ВРАЧЕЙ

ПЕРВЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ КАНАЛ – СОВРЕМЕННЫЙ
ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫЙ ПОМОЩНИК ВРАЧА
В ЕЖЕДНЕВНОЙ ПРАКТИКЕ И НАДЕЖНЫЙ ИСТОЧНИК
ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

ДИСТАНЦИОННОЕ ОБРАЗОВАНИЕ,
ВКЛЮЧАЯ СИСТЕМУ НМО

ПРЯМОЕ ОБЩЕНИЕ С ЛЕКТОРАМИ В РЕЖИМЕ ON- И OFFLINE

БОЛЕЕ 100 ТРАНСЛЯЦИЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИХ
КОНГРЕССОВ И ФОРУМОВ В ГОД

10-ЧАСОВОЙ РЕЖИМ ВЕЩАНИЯ 5 ДНЕЙ В НЕДЕЛЮ

РЕГИСТРИРУЙТЕСЬ НА САЙТЕ WWW.1MED.TV И ПОЛУЧИТЕ ДОСТУП
К БОГАТОЙ ВИДЕОБИБЛИОТЕКЕ КАНАЛА!

1MED TV

Реклама



@1MEDTV



ПЕРВЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ КАНАЛ



8 800 100 17 86



INFO@1MED.TV