

УДК 616.8-089:62.002

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ В ОБУЧЕНИИ НЕЙРОХИРУРГОВ

<sup>1</sup>Мишинов С.В., <sup>1</sup>Ступак В.В., <sup>1</sup>Мамуладзе Т.З., <sup>1</sup>Копорущко Н.А., <sup>2</sup>Мамонова Н.В., <sup>3</sup>Панченко А.А., <sup>3</sup>Красовский И.Б., <sup>1,4</sup>Рабинович С.С., <sup>5</sup>Ларькин В.И., <sup>6</sup>Долженко Д.А., <sup>7</sup>Новокшенов А.В.

<sup>1</sup>ФГБУ «Новосибирский научно-исследовательский институт травматологии и ортопедии им. Я.Л. Цивьяна», Новосибирск, e-mail: smishinov@yandex.ru;

<sup>2</sup>ООО «Инжиниринговый медико-технологический центр», Новосибирск;

<sup>3</sup>ООО «Логикс», Новосибирск;

<sup>4</sup>ФГБОУ ВО НГМУ Минздрава России, Новосибирск;

<sup>5</sup>ФГБОУ ВО ОмГМУ, Омск;

<sup>6</sup>КГБУЗ «Краевая клиническая больница», Барнаул;

<sup>7</sup>ГАУЗ Кемеровской области «Областной клинический центр охраны здоровья шахтеров», Ленинск-Кузнецкий

Закрепление и совершенствование мануальных навыков – одна из важнейших задач практикующих нейрохирургов. Как известно, эталоном для обучения являются занятия в анатомических лабораториях на трупном материале, однако такой вид образования возможен лишь на территории медицинских вузов или организаций, имеющих соответствующую материальную и правовую базу. Временные и материальные ресурсы такого рода учреждений ограничены, поэтому использование муляжей и моделей, максимально приближенных к реальным, является крайне востребованным. Развитие компьютерного трехмерного моделирования и трехмерной печати нашло свое применение в образовательной отрасли, поскольку созданные данным путем модели подробно повторяют анатомию прототипа. В настоящем обзоре рассмотрены наиболее распространенные методы трехмерной печати, используемые на территории Российской Федерации (FDM, SLA и SLS), а также собственный опыт трехмерного моделирования и прототипирования трехмерных моделей.

**Ключевые слова:** трехмерное моделирование, трехмерная печать, образование в нейрохирургии, нейрохирургические доступы, анатомия центральной нервной системы

## THREE DIMENSIONAL MODELING AND PRINTING FOR EDUCATION IN NEUROSURGERY

<sup>1</sup>Mishinov S.V., <sup>1</sup>Stupak V.V., <sup>1</sup>Mamuladze T.Z., <sup>1</sup>Koporushko N.A., <sup>2</sup>Mamonova N.V., <sup>3</sup>Panchenko A.A., <sup>3</sup>Krasovsky I.B., <sup>1,4</sup>Rabinovich S.S., <sup>5</sup>Larkin V.I., <sup>6</sup>Dolzhenko D.A., <sup>7</sup>Novokshonov A.V.

<sup>1</sup>Novosibirsk Research Institute of Traumatology and Orthopaedics n.a. Y.L. Tsivyan, Novosibirsk, e-mail: smishinov@yandex.ru;

<sup>2</sup>Engineering medical center, Novosibirsk;

<sup>3</sup>Logeeks, Novosibirsk;

<sup>4</sup>Novosibirsk State Medical University, Novosibirsk;

<sup>5</sup>Omsk State Medical University, Omsk;

<sup>6</sup>Regional clinical hospital, Barnaul;

<sup>7</sup>Regional Clinical Center of the Miners Health Protection, Leninsk-Kuznetsky

Consolidation and improvement of practical manual skills one of the most important aim for practicing neurosurgeons. Cadaver classes in anatomy laboratories is the “gold standard”, but this kind of education is possible only in medical universities or organizations that have the appropriate material and legal base. Thus, use of high-quality dummies and models, as close to real is in great demand. The development of computer three-dimensional modeling and three-dimensional printing has found its application in the industry, because built by this method models in detail repeat the anatomy of the created region. In this review we examined the most common methods of three-dimensional printing, used on the territory of the Russian Federation: FDM, SLA, and SLS. Analyzed own experience of three-dimensional modeling and prototyping of three-dimensional models.

**Keywords:** three-dimensional modeling, three dimensional printing, education in neurosurgery, neurosurgical approaches, anatomy of the central nervous system

Вопросы образования и отработки практических навыков являются ключевыми в любых отраслях, и клинические медицинские специальности не исключение. Особенно актуальны данные вопросы в хи-

рургии, где врачам необходимо не только постоянное совершенствование и оттачивание мануальных навыков, но и регулярные теоретические занятия по закреплению знаний о нормальной и патологической анато-

мии. В настоящее время на территории РФ введен проект о непрерывном образовании медицинских и фармацевтических работников [1], что стимулирует специалистов к участию в различных конференциях, школах и семинарах. В рамках указанных мероприятий зачастую проводятся курсы по совершенствованию практических навыков, где они отрабатываются на муляжах и моделях. Как известно, эталоном для обучения являются занятия в анатомических лабораториях на трупном материале, однако такой вид образования возможен лишь на территории медицинских вузов или организаций, имеющих соответствующую материальную и правовую базу. Временные и материальные ресурсы такого рода учреждений ограничены, поэтому использование муляжей и моделей, максимально приближенных к реальным, является крайне востребованным. Применительно к нейрохирургии можно выделить следующие основные образовательные направления: изучение нормальной анатомии черепа, сосудов головного мозга, краниальных нервов и анатомии головного мозга; освоение основных нейрохирургических доступов к различным анатомическим структурам черепа и головного мозга. А также изучение нормальной анатомии позвоночника, спинного мозга, его корешков и сосудов; изучение основных нейрохирургических доступов к различным анатомическим структурам позвоночного столба и спинного мозга.

Развитие компьютерного трехмерного моделирования и трехмерной печати нашло свое применение в указанной отрасли, поскольку произведенные данным путем модели подробно повторяют анатомию создаваемой области.

В настоящее время существует несколько методов трехмерной печати, с помощью которых можно создавать пространственные модели. Далее мы рассмотрим наиболее активно используемые на территории Российской Федерации.

Целью данного представленного обзора является выбор оптимального метода трехмерной печати для построения анатомических моделей для практических нейрохирургических образовательных курсов.

**Результаты и обсуждение.** Рассмотрим методы в порядке возрастания степени сложности технологии трехмерной печати. Первым является моделирование методом послойного наплавления (англ. Fused Deposition Modeling – FDM) – технология, широко используемая для создания трехмерных моделей, при прототипировании и в промышленном производстве.

Технология FDM подразумевает создание трехмерных объектов за счет нанесения

последовательных слоев материала, повторяющих контуры цифровой модели. Обычно в качестве материалов для печати выступают термопластики, поставляемые в виде катушек нитей или прутков.

Изделие, или модель, производится выдавливанием (экструзией) и нанесением микрокапель расплавленного термопластика с формированием последовательных слоев, застывающих сразу после экструдирования.

Нагревательный элемент служит для нагревания сопла, которое в свою очередь плавит пластиковую нить и подает расплавленный материал на строящуюся модель. Как правило, верхняя часть сопла, наоборот, охлаждается с помощью вентилятора для создания резкого градиента температур, необходимого для обеспечения плавной подачи материала.

Технология FDM отличается высокой гибкостью, но имеет определенные ограничения. Хотя формирование нависающих структур возможно при небольших углах наклона, в случае с большими углами необходимо использование искусственных опор, создающихся в процессе печати и отделяемых от модели по завершении процесса. В качестве расходных материалов доступны всевозможные термопластики и композиты, включая ABS, PLA, поликарбонаты, полиамиды, полистирол, лигнин и многие другие. Различные материалы предоставляют выбор баланса между определенными прочностными и температурными характеристиками. Изменяя плотность прилегания слоев используемого в FDM-печати материала, можно добиться симуляции прочности модели, т.е. создавать модели, по своим плотностным и тактильным характеристикам близких к естественным [8, 4].

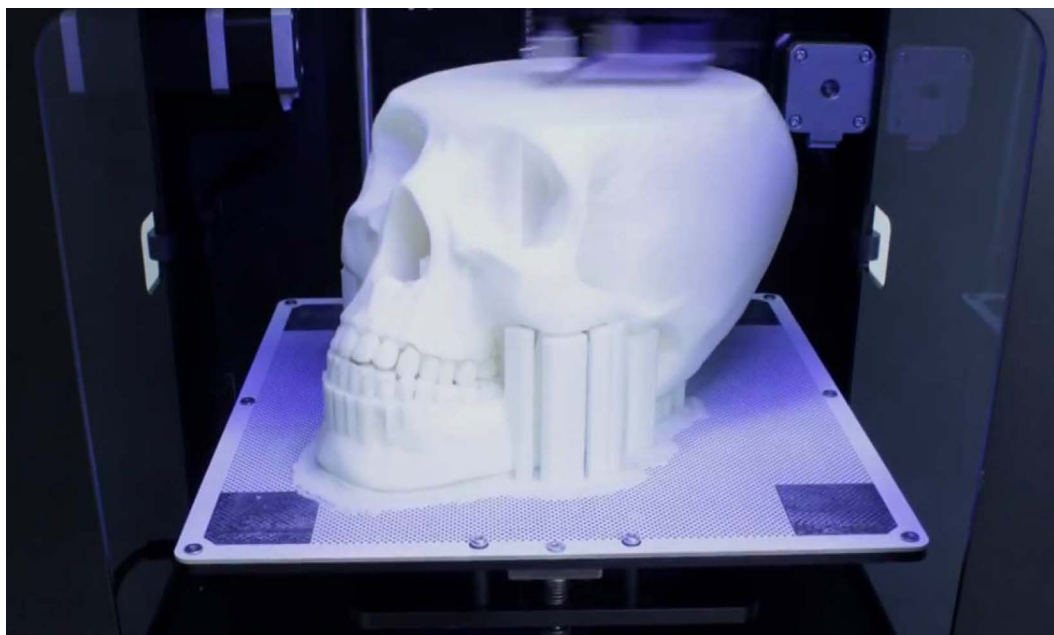
Моделирование методом послойного наплавления применяется для быстрого прототипирования и быстрого производства, что облегчает повторное тестирование с последовательной, пошаговой модернизацией объекта. FDM-печать является одним из наименее дорогих методов, обеспечивающим растущую популярность бытовых принтеров, основанных на этой технологии.

С помощью данного вида печати нами был создан ряд моделей – от фрагментов костей черепа и позвоночника до полноразмерного черепа в масштабе 1:1 (рисунок 1). При этом все основные анатомические ориентиры были легко узнаваемы, а плотностные характеристики были схожими с костными тканями человека.

В ходе симуляции краниотомии на данной модели было отмечено, что по плотности и поведению материал схож с настоящими костями черепа. Это позволило сделать

вывод о том, что данный вид печати дает возможность создавать модели для отработки навыков краниотомии и ламинотомии. С другой стороны, прецизионность FDM-печати составляет порядка 100 микрон, поэтому производство сложных пространственных моделей и точное копирование таких анатомических структур, как основание черепа или пирамида височной кости, затруднительно.

ля промываются для удаления остаточного материала и при необходимости подвергаются обработке в ультрафиолетовой печи до полного затвердевания фотополимера. Стереолитография требует использования поддерживающих структур для навесных элементов модели, аналогично технологии моделирования методом послойного наплавления (FDM). По сути, опоры являются временными элементами конструкции,



*Рис. 1. Процесс создания полноразмерной анатомической модели черепа путем FDM-печати*

Стереолитография (SLA или SL) – технология производства моделей, прототипов и готовых изделий из жидких фотополимерных смол. Отвердевание смолы происходит за счет облучения ультрафиолетовым лазером или другим схожим источником энергии. Построение модели производится слой за слоем, и каждый слой вычерчивается лазером согласно данным, заложенным в трехмерной цифровой модели. Облучение лазером приводит к полимеризации (т.е. затвердеванию) материала в точках соприкосновения с лучом. С помощью стереолитографии создаются модели высокого разрешения [1, 8]. По завершении построения контура рабочая платформа погружается в бак с жидкой смолой на дистанцию, равную толщине одного слоя – как правило, от 0,05 до 0,15 мм. После выравнивания поверхности жидкого материала начинается процесс построения следующего слоя. Цикл повторяется до образования полной модели. После завершения постройки изде-

удаляемыми вручную после завершения процесса изготовления. Главным преимуществом стереолитографии можно считать высокую точность печати. Слои могут наноситься толщиной до 15 микрон, что в несколько раз меньше толщины человеческого волоса. Готовые изделия обладают различными механическими свойствами в зависимости от заложенных характеристик фотополимера. Помимо этого в стереолитографии возможно использование полупрозрачных термосмол, что позволяет конструировать не только высокоточные копии анатомических объектов, но и делать их полупрозрачными. Данный факт играет важную роль при изучении анатомии таких структур, как пирамида височной кости, клиновидная кость, решетчатый лабиринт (рисунок 2). Детали, созданные методом стереолитографии, отличаются высокой сложностью, но зачастую дорогие из-за относительно высокой цены расходных материалов.



*Рис. 2. Анатомическая модель: фрагмент костей черепа передней черепной ямки в разрезе*

Выборочное лазерное спекание (Selective Laser Sintering) – технология основана на последовательном спекании слоев порошкового материала с помощью лазеров высокой мощности. SLS-печать подразумевает использование одного или нескольких лазеров (как правило, углекислотных) для спекания частиц порошкообразного материала до образования трехмерного физического объекта. В качестве расходных материалов используются пластики, металлы, керамика или стекло. Спекание производится за счет вычерчивания контуров, заложенных в цифровой модели, с помощью одного или нескольких лазеров. По завершении сканирования рабочая платформа опускается и наносится новый слой материала. Процесс повторяется до образования полной модели. Специфика технологии заключается в том, что можно создавать детали практически неограниченной сложности из различных материалов [7, 9]. Так как плотность изделия зависит не от продолжительности облучения, а от максимальной энергии лазера, в основном используются пульсирующие излучатели. Перед началом печати расходный материал подогревается до температуры чуть ниже точки плавления, чтобы облегчить процесс спекания. В отличие от таких методов, как стереолитография (SLA) или моделирование методом послойного наплавления (FDM), SLS не требует построения опорных структур, таким образом, максимально снижаются временные затраты на постобработку изделий [5, 9]. Навесные части модели поддерживаются неизрасходованным материалом. Такой подход позволяет добиться любой геометрической сложности изготавливаемых моделей (рисунок 3). В сравнении с другими методами аддитивного производства SLS отличается высокой

универсальностью в плане выбора расходных материалов.



*Рис. 3. Анатомическая модель: срез основания черепа*

SLA- и SLS-печать идентичны по точности получаемых моделей, но являются в разы более дорогостоящими по сравнению с FDM-печатью. В связи с чем, был проведен сопоставительный анализ: каким из представленных методов и какие модели предпочтительнее создавать каждым из конкретных способов.

Для SLA- и SLS-печати требуются промышленные принтеры, которые имеют технические требования для помещений и условий работы с данными установками; таким образом, создание моделей возможно централизованно, в условиях промышленного производства. С другой стороны, FDM-принтеры не столь требовательны к условиям эксплуатации, могут работать непосредственно на образовательных базах и удовлетворять потребность в образовательных моделях. Исходя из изложенного выше, на наш взгляд, для создания полно-размерных моделей черепа или фрагментов позвоночного столба предпочтительнее использовать FDM-печать. Как правило, во время проведения образовательных циклов по нейрохирургическим доступам такие изделия используются однократно, после чего встает вопрос об их утилизации. В таком виде печати возможно использование PLA- и PVA-пластиков, которые являются биodeградируемыми и не наносят вред окру-

жающей среде. Для создания фрагментов костей черепа с целью изучения анатомии требуется высокоточное воспроизведение анатомических структур, поэтому для данного вида печати предпочтительнее использовать SLA- и SLS-методы. При этом путем стереолитографии возможно создание полупрозрачных моделей, что позволяет строить наглядные модели тех областей, где внутри кости имеются различные каналы и ходы, как, к примеру, пирамида височной кости или основная кость. Создание полноразмерных моделей черепа или позвоночника путем SLA- и SLS-печати является малооправданным, поскольку указанные методы в разы более затратные по сравнению с FDM-печатью.

**Заключение.** Проанализировав литературу и собственный опыт трехмерного моделирования, прототипирования и печати, мы считаем, что в настоящее время, исходя из технологий трехмерной печати, доступных на территории Российской Федерации, оптимальным для создания полноразмерных моделей черепа и позвоночного столба с целью совершенствования навыков хирургических доступов является метод послойного наплавления (FDM-печать). Для создания фрагментов костей черепа и костей позвоночника с целью изучения анатомии предпочтительнее использовать SLA- и SLS-методы печати. Дальнейшее развитие методов трехмерного моделирования и печати позволит внедрить данные

подходы в рутинную образовательную клиническую практику.

#### Список литературы

1. Коновалов А.Н. Реконструктивная и минимально инвазивная хирургия последствий черепно-мозговой травмы : руководство для врачей / А.Н. Коновалов, А.А. Потапов, Л.Б. Лихтерман. – М.: Т.А. Алексеева, 2012. – 320 с.
2. Координационный совет по развитию непрерывного медицинского и фармацевтического образования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sovetnmo.ru> (дата обращения 21.10.2016).
3. Cheng W., Fuh J.Y.H., Nee A.Y.C. et al. Multi-objective optimization of part building orientation in stereolithography // *Rapid Prototyping Journal*. – 1995. – Vol. 1. № 4. – PP. 12–23.
4. Domingo-Espin M., Borros S., Agulló N. et al. Influence of building parameters on the dynamic mechanical properties of polycarbonate fused deposition modeling parts // *3D Printing and Additive Manufacturing*. – 2014. – Vol. 1. № 2. – PP. 70–77.
5. Chia H., Wu B.M. Recent advances in 3D printing of biomaterials // *Journal of Biological Engineering*. – 2015. – Vol. 9. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1186/s13036-015-0001-4>
6. Hao L., Savalani M.M., Zhang, Y. et al. Selective laser sintering of hydroxyapatite reinforced polyethylene composites for bioactive implants and tissue scaffold development // *Journal of Engineering in Medicine*. – 2006. – Vol. 220. № 4. – PP. 521–531.
7. Kinstlinger I.S., Bastian A., Paulsen S.J. et al. Open-source selective laser sintering (OpenSLS) of nylon and biocompatible polycaprolactone // *PLoS One*. – 2016. – Vol. 3. – PP. 1–25.
8. Sood A.K., Ohdar R.K., Mahapatra S.S. Experimental investigation and empirical modeling of FDM process for compressive strength improvement // *Journal of Advanced Scientific Research*. – 2012. – Vol. 3. № 1. – PP. 81–90.
9. Zhou W.Y., Wang M., Cheung W.L. et al. Selective Laser Sintering of Poly (L-Lactide) / Carbonated Hydroxyapatite Nanocomposite Porous Scaffolds for Bone Tissue Engineering – Rijeka: InTech, Tissue Engenering. – 2010. 524 p. – Chapter 9. PP. 179–204.