

УДК: 616.13-089

Майстренко Дмитрий Николаевич

доктор медицинских наук,
директор Центра,
Российский научный центр радиологии и хирургических
технологий им. акад. А.М.Гранова
mi_generalov@rrcrst.ru

Генералов Михаил Игоревич

кандидат медицинских наук,
заведующий отделением сосудистой и
рентгенэндоваскулярной хирургии,
Российский научный центр радиологии и
хирургических технологий им. акад. А.М.Гранова
mi_generalov@rrcrst.ru

Николаев Дмитрий Николаевич

кандидат медицинских наук,
руководитель группы медицинского
приборостроения, Российский научный центр
радиологии и хирургических технологий им. акад. А.М.Гранова

Dmitry N. Maystrenko

Doctor of Sciences in Medicine,
Director,
Granov Russian Research Center of Radiology and
Surgical Technologies

dn_maystrenko@rrcrst.ru

Mikhail I. Generalov

Candidate of Sciences in Medicine
Head of the Department of Vascular and Endovascular
Surgery Granov Russian Research Center of Radiology
and Surgical Technologies

mi_generalov@rrcrst.ru

Dmitry N. Nikolaev

Candidate of Sciences in Medicine
Medical Instrumentation Group Leader
Granov Russian Research Center of Radiology and Surgical Technologies

dn_nikolaev@rrcrst.ru

ВЫСОКОТОЧНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНДОВАСКУЛЯРНЫХ ВМЕШАТЕЛЬСТВ НА ПЕРИФЕРИЧЕСКИХ АРТЕРИЯХ¹

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства здравоохранения Российской Федерации (тема № 121040200143-8)

HIGH-FIDELITY MODELING OF ENDOVASCULAR INTERVENTIONS ON PERIPHERAL ARTERIES

***Аннотация.** В настоящее время высокотехнологичные малоинвазивные вмешательства широко внедряются в лечении сосудистой патологии. Подготовка медицинских специалистов к требованиям гибридной хирургии, работа в условиях персонализированного подхода к каждому пациенту, стремление к максимальному снижению рисков операции – всё это подчинено получению лучшего результата лечения больного. В статье рассматриваются возможности, которые открывают современные разработки по моделированию в образовательном процессе и лечебной практике.*

***Ключевые слова:** сосудистая хирургия, эндоваскулярная хирургия, хирургический симулятор, планирование, 3D-моделирование, высокие технологии.*

***Annotation.** High-tech minimally invasive interventions are widely used in the treatment of vascular pathology. Training of medical specialists for hybrid surgery, a personalized approach to the patient, the maximum reduction of the risks of surgery - all this is subordinated to the best result of the patient's treatment. The article discusses the possibilities of modern developments in modeling for the educational process and medical practice of vascular surgeons.*

***Key words:** vascular surgery, endovascular surgery, surgical simulator, planning, 3D modeling, high technology.*

В современной хирургии моделирование различных состояний, ситуаций и действий находит все более широкое распространение для подготовки специалистов, повышению их уверенности и производительности на рабочем месте[1; 2]. Такая подготовка повышает безопасность пациентов и медицинского персонала, увеличивает шанс успешного исхода хирургической операции, особенно в наиболее сложных или редких случаях, улучшает результаты лечения[3].

Симуляция обычно используется в сфере минимально инвазивных вмешательств в виде цифрового моделирования, включающего работу в трехмерном поле при просмотре на двухмерном мониторе. Наиболее широко данная методика применяется в подготовке к лапароскопическим операциям в общей хирургии, акушерстве и гинекологии, урологии[4]. Конечная цель использования симуляции с высокой точностью - уменьшить кривую обучения любой процедуре и достичь устойчивого хирургического навыка до того, как специалист практически применит полученный навык на пациенте.

В настоящее время открытое хирургическое лечение различных сосудистых патологий в значительной степени замещается высокотехнологичными эндоваскулярными вариантами вмешательств. Такие методы, как баллонная ангиопластика, внутрипросветные варианты атерэктомии, стентирование сосудов прочно входят в арсенал сосудистых хирургов. Однако из-за новизны применяемого оборудования, постоянно

совершенствующихся специализированных инструментов, специфических приемов их использования в процессе операции, в результате повышается уровень ошибок[5].

Цель данного сообщения – предоставить обзор моделирования в том, что касается эндоваскулярных методов лечения сосудистой патологии, постараться оценить его эффективность, с учётом имеющихся ограничений моделей, обсудить пути персонализированного подхода в сосудистой хирургии.

В англоязычной литературе для описания того, насколько симулятор близок к имитации реального жизненного опыта, а также возможности переноса навыков в обстановку пациента используется термин «fidelity» - «точность». При этом «точность» моделирования бывает разной: низкая, средняя или высокая. Рекомендуемый уровень «точности» симулятора зависит от сложности навыка, который необходим для получения обучающемуся[6].

Симуляторы с низкой точностью воспроизведения, как правило, неподвижны, не могут имитировать реальность или ситуативный контекст и используют материалы, которые отличаются от рассматриваемой задачи. В качестве примера можно привести манекен частей тела (для простейшей тренировки сердечно-лёгочной реанимации, катетеризации вены), силиконовые или биологические модели для отработки навыков пункции сосуда под контролем ультразвука или взятия биопсии, протезы для отработки навыков хирургического шва и формирования различных анастомозов [7]. Такие модели с низкой точностью воспроизведения полезными при обучении базовым навыкам и идеально подходят для новичков, которым более сложные функции могут показаться слишком сложными.

Симуляторы средней точности обычно предлагают более реалистичные функции, пример – манекен человека для отработки медицинскими работниками действий при сердечной патологии (внезапной остановке кровообращения, асистолии, тахикардии и пр.) или оказанию помощи пострадавшему с травмами на догоспитальном этапе[8; 9], однако, как и симуляторы с низкой точностью воспроизведения, они не подходят для более сложных процедур, таких как хирургические или эндоваскулярные вмешательства.

Третья группа – симуляторы с высокой точностью воспроизведения, использующие реалистичные и сложные материалы для представления окружающей обстановки, достигающие высокой степени визуального и слухового реализма, взаимодействия инструментов и тактильной обратной связи. К тренажерам такого типа могут быть отнесены операции на животных и трупах, однако по множеству причин, включая высокую стоимость и этические проблемы, эти модели используются нечасто. Животные способны обеспечить достаточную тактильную обратную связь, но не отражают реальную анатомию человека. Человеческие трупы способны имитировать анатомию живого человека с высокой реалистичностью, однако, как и в симуляторах животных, имеют ограниченное количество попыток отработки одной и той же

процедуры, на них сложно смоделировать требуемые патологические состояния [10-12].

Обратная связь, возможность повторения и программирования уровня сложности задания, интерактивность и индивидуализированное обучение – вот основы современного симуляционного обучения. Все это стало возможным с использованием симуляторов с высокой точностью воспроизведения [13-15]. Наиболее распространенные в мире - Procedureicus VIST (Mentice AB, Швеция) и ANGIO Mentor (3D Systems, США). Эти учебные станции позволяют вводить проводник и катетер, «выполнять» баллонную ангиопластику, стентирование и другие эндоваскулярные вмешательства на аорте, церебральных, сонных, коронарных, почечных и подвздошных артериях. Также они обеспечивают визуальную и тактильную обратную связь, сбор контрольных параметров (время операции, лучевую нагрузку «пациента» и оператора, объем введенного рентгеноконтрастного препарата и др.). По заверениям компаний-производителей, такие учебные станции могут хранить до сотен различных клинических случаев [16; 17]. Эти устройства, несомненно, хороши и даже необходимы, в процессе обучения молодых специалистов, либо отработки навыков применения новых устройств или хирургических приемов врачами-профессионалами. Однако из-за достаточно высокой цены подобные симуляторы скорее необходимы университетским клиникам и учебным центрам, где имеется постоянный большой поток обучающихся. Для практического здравоохранения, хирургических центров высокотехнологичной медицинской помощи, на наш взгляд, требуются несколько другие модели.

Благодаря имеющимся достижениям в области технологии трехмерной печати, трехмерная реконструкция и трехмерные печатные модели для конкретных пациентов, могут играть решающую роль в хирургии как в образовательных целях, так и в планировании операций. Модели, напечатанные на 3D-принтере, позволяют врачам лучше воспринимать 3D-изображения и получать тактильную обратную связь, а также способствуют использованию командного подхода к операционному планированию [18-20].

Рядом авторов было высказано мнение, что 3D-печатные модели в области сосудистой хирургии и сосудистой интервенционной радиологии полезны в ходе планирования сложного хирургического вмешательства, могут повысить подготовку хирургической бригады к операции, особенно при развитии какой-либо нештатной ситуации, снизить лучевую нагрузку на пациента и медицинский персонал [21-25].

В своей практике мы имеем некоторый опыт применения 3D-печатных моделей в планировании сосудистых хирургических вмешательств (рис.1). Наиболее предпочтителен прозрачный материал 3D-модели. Это позволяет упростить визуализацию внутренних стенок сосуда, что очень важно для предоперационного планирования врачом-специалистом. В сложных случаях можно предсказать возможные осложнения, сосудистые хирурги могут заранее исключить определенные методы и отдать предпочтение другим задолго до того, как пациент окажется на операционном столе. В идеале это будет

способствовать сокращению времени операции, что, в свою очередь, позволит увеличить эффективность лечебного процесса за счет высвобождения ограниченных ресурсов, экономии дорогостоящих инструментов для эндоваскулярных вмешательств.

Общая процедура, необходимая для разработки 3D-печатной модели, состоит из трех основных этапов:

- получение изображения;
- сегментация и постобработка для создания математической модели;
- сама печать [26, 27].

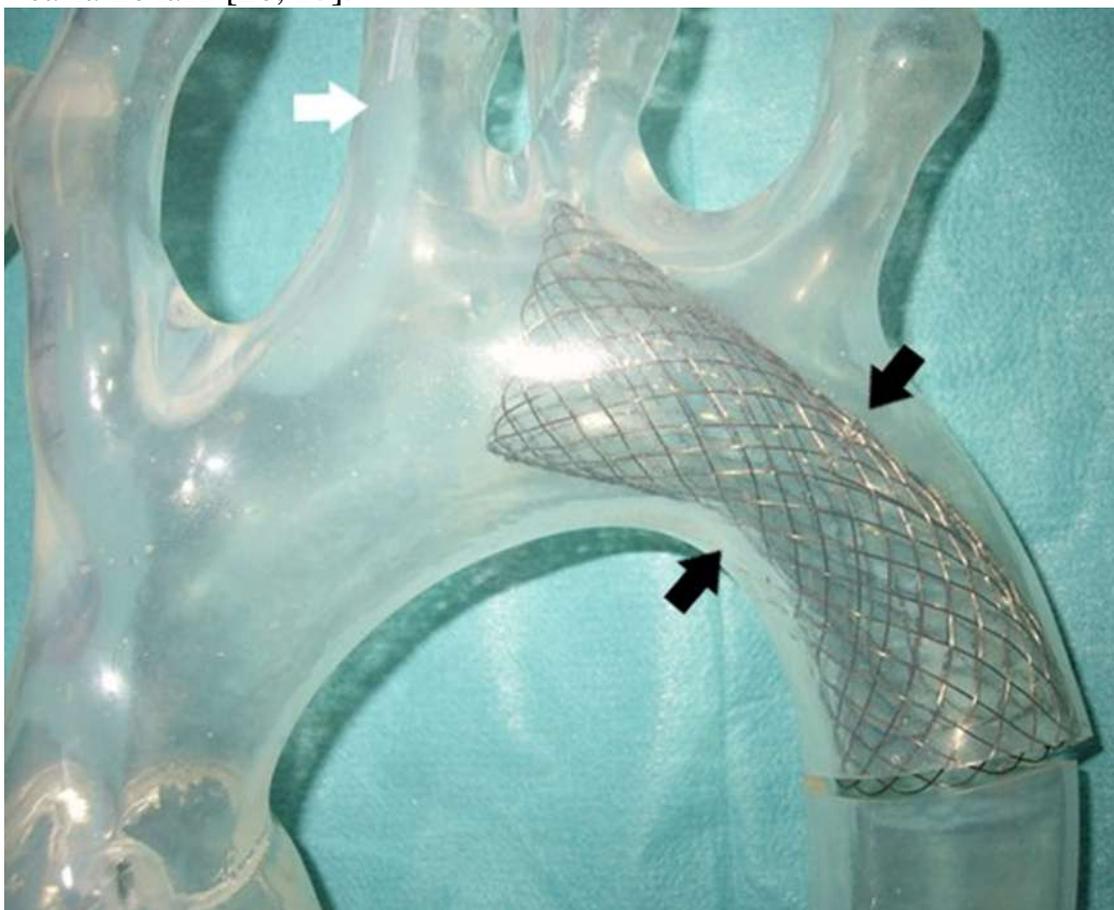


Рис.1. 3D-модель дуги аорты пациента, имеется вариант сосудистой анатомии брахиоцефальных артерий – аберрантная правая подключичная артерия, отходящая от аорты (белая стрелка). Планирование эндоваскулярного вмешательства. В процессе подбора стента, заранее выявлена деформация конструкции в заданных анатомических условиях (черные стрелки), которая могла бы привести к осложнениям во время операции.

В сосудистой хирургии компьютерная томография (КТ) с внутривенным контрастированием является наиболее предпочтительным исследованием, поскольку оно позволяет оптимально увеличить контрастность просвета исследуемого сосуда. Магнитно-резонансная томография (МРТ) с контрастным усилением также может быть столь же эффективной, как и КТ с внутривенным контрастированием, при этом избегая побочных эффектов радиации и почечной дисфункции от использования внутривенного контраста. Выбор между этими

двумя исследованиями зависит от доступности этих методов визуализации, опыта специалистов центра и наличия у пациента противопоказаний к использованию компьютерной томографии или магнитно-резонансной томографии[28].

Одним из наиболее сложных аспектов создания трехмерной реконструкции сосудистой сети является выполнение процесса сегментации. Визуализация с высокой степенью дифференциации контраста значительно повышает простоту и точность процесса сегментации. В дополнение к использованию КТ с контрастом, меньшая толщина среза (0,5-1,0 мм) обеспечивает более высокое разрешение для 3D-реконструкции и, следовательно, более точную 3D-печатную модель. Однако эти настройки не всегда позволяют использовать инструменты автоматической обработки трехмерной области во время этого этапа работы. В такой ситуации часто требуется выполнение ручной сегментации маски разделения срезов, что может увеличить время данного процесса от 12-18 часов до нескольких суток[29; 30]. На наш взгляд, именно оптимизация этого этапа, ускорение процесса сегментации будет способствовать широкому внедрению технологии 3D-моделирования в практическую хирургию.

Выполнение печати аорты и артерий также является проблемой из-за извилистости сосудов, стенозов или окклюзии на различных уровнях. Экструзионные принтеры очень ограничены в печатных структурах с высокой степенью вылета. Программное обеспечение для создания 3D-печати может включать систему поддержки, чтобы преодолеть это ограничение. Однако некоторые объекты не могут быть успешно напечатаны даже с опорой для печати с использованием экструзионного принтера. Печать модели корпуса, для которой требуются материалы внутренней поддержки, также представляет собой серьезную проблему. В примере включенной аорты просвет этого сосуда необходимо было заполнить опорной структурой, которую позже удалили вручную. Другой альтернативой является использование принтера для осаждения с двумя соплами. В этом случае одно сопло печатает модель оболочки из полимолочной кислоты, а другое сопло печатает опорные конструкции из поливинилового спирта, который растворим в воде и легко смывается[31-33].

В зависимости от типа материала, размера и продолжительности печати, стоимость такой модели может быть неоправданно высокой для больницы и варьировать от десятков до сотен тысяч рублей.

Таким образом, как нам представляется, создание фантомов различных артериальных бассейнов для конкретного клинического случая за счёт применения специализированного программного обеспечения и аддитивных технологий в сосудистой хирургии имеет большие перспективы. Для реализации такого персонализированного подхода к проблемам лечения сложных пациентов требуется коллаборация IT-специалистов, инженеров и врачей-хирургов. Ключевыми точками могут считаться разработка более быстрого процесса сегментации КТ- и МРТ-изображений, поиск более дешевых

материалов для печати, выбор оптимальной модели принтера и подготовка опытного персонала, что значительно снизит время изготовления высокоточных 3D-моделей и цену на их производство.

Литература / References:

1. Davis L.E., Storjohann T.D., Spiegel J.J., et al. High-fidelity simulation for advanced cardiac life support training. *Am. J. Pharm. Educ.* 2013; 77: 59.
2. Fried G.M., Feldman L.S., Vassiliou M.C., et al. Proving the value of simulation in laparoscopic surgery. *Ann. Surg.* 2004; 240: 518-525.
3. Stunt J., Wulms P., Kerkhoffs G., et al. How valid are commercially available medical simulators? *Adv. Med. Educ. Pract.* 2014; 5: 385-395.
4. Aggarwal R., Grantcharov T.P., Eriksen J.R., et al. An evidence-based virtual reality training program for novice laparoscopic surgeons. *Ann. Surg.* 2006; 244: 310-314.
5. Patel S.R., Gohel M.S., Hamady M., et al. Reducing errors in combined open/endovascular arterial procedures: Influence of a structured mental rehearsal before the endovascular phase. *J. Endovasc. Ther.* 2012; 19: 383-389.
6. Amin A., Salsamendi J., Sullivan T. High-fidelity endovascular simulation. *Tech. Vasc. Interv. Radiol.* 2019; 22 (1): 7-13.
7. May B.J., Khoury J.K., Winokur R.S. Tools for simulation; low budget and no budget. *Tech. Vasc. Interv. Radiol.* 2019; 22 (1): 3-6.
8. McCoy C.E., Rahman A., Rendon J.C., et al. Randomized controlled trial of simulation vs. standard training for teaching medical students high-quality cardiopulmonary resuscitation. *West. J. Emerg. Med.* 2019; 20 (1): 15-22.
9. Long A., Lefebvre C., Masneri D., et al. The golden opportunity: multidisciplinary simulation training improves trauma team efficiency. *J. Surg. Educ.* 2019; 76 (4): 1116–1121.
10. Brydges R., Carnahan H., Rose D., et al. Coordinating progressive levels of simulation fidelity to maximize educational benefit. *Acad. Med.* 2010; 85 (5): 806-812.
11. Sarkar A., Kalsi R., Ayers J.D., et al. Continuous flow perfused cadaver model for endovascular training, research, and development. *Ann. Vasc. Surg.* 2018; 48: 174-181.
12. Aziz F., Chia M., Jazaeri O., et al. Vascular and endovascular surgical procedural skills training: Survey of vascular surgery program directors about extracurricular vascular surgical educational courses for vascular trainees. *Ann. Vasc. Surg.* 2021; S0890-5096 (21): 00735-4.
13. Cook D.A., Hamstra S.J., Brydges R. et al. Comparative effectiveness of instructional design features in simulation-based education: Systematic review and meta-analysis. *Med. Teach.* 2013; 35: E844-E875.
14. Klein K.A., Neal C.H. Simulation in radiology education: Thinking outside the phantom. *Acad. Radiol.* 2016; 23: 908-910.

15. Rudarakanchana N., Van Herzele I., Desender L., et al. *Virtual reality simulation for the optimization of endovascular procedures: Current perspectives.* *Vasc. Health. Risk. Manag.* 2015; 11: 195-202.
16. Rangarajan K., Davis H., Pucher P.H. *Systematic review of virtual haptics in surgical simulation: A valid educational tool?* *J. Surg. Educ.* 2020; 77 (2): 337-347.
17. Moglia A., Piazza R., Mocellin D.M., et al. *Definition of proficiency level by a virtual simulator as a first step toward a curriculum on fundamental skills for endovascular aneurysm repair (EVAR).* *J. Surg. Educ.* 2020; 77 (6): 1592-1597.
18. Chang D., Tummala S., Sotero D., et al. *Three-dimensional printing for procedure rehearsal/simulation/planning in interventional radiology.* *Tech. Vasc. Interv. Radiol.* 2019; 22 (1): 14-20.
19. Tack P., Victor J., Gemmel P., Annemans L. *3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review.* *Biomed. Eng. Online.* 2016; 15 (1): 115.
20. Hangge P., Pershad Y., Witting A.A., et al. *Three-dimensional (3D) printing and its applications for aortic diseases.* *Cardiovasc. Diagn. Ther.* 2018; 8 (Suppl. 1): S19-S25.
21. Wang H., Song H., Yang Y., et al. *Three-dimensional printing for cardiovascular diseases: from anatomical modeling to dynamic functionality.* *Biomed. Eng. Online.* 2020; 19 (1): 76.
22. Ferrari E., Gallo M., Wang C., et al. *Three-dimensional printing in adult cardiovascular medicine for surgical and transcatheter procedural planning, teaching and technological innovation.* *Interact. Cardiovasc. Thorac. Surg.* 2020; 30 (2): 203-214.
23. Coles-Black J., Bolton D., Robinson D., Chuen J. *Utility of 3D printed abdominal aortic aneurysm phantoms: a systematic review.* *ANZ J. Surg.* 2021; 91 (9): 1673-1681.
24. Coles-Black J., Bolton D., Chuen J. *Accessing 3D printed vascular phantoms for procedural simulation.* *Front. Surg.* 2021; 7: 626212.
25. El Sabbagh A., Eleid M.F., Matsumoto J.M., et al. *Three-dimensional prototyping for procedural simulation of transcatheter mitral valve replacement in patients with mitral annular calcification.* *Catheter. Cardiovasc. Interv.* 2018; 92 (7): E537-E549.
26. Mitsouras D., Liacouras P., Imanzadeh A., et al. *Medical 3D printing for the radiologist.* *Radiographics.* 2015; 35 (7): 1965-1988.
27. Squelch A. *3D printing and medical imaging.* *J. Med. Radiat. Sci.* 2018; 65 (3): 171-172.
28. Liaw C.Y., Guvendiren M. *Current and emerging applications of 3D printing in medicine.* *Biofabrication.* 2017; 9 (2): 024102.
29. Paul G.M., Rezaenia A., Wen P., et al. *Medical applications for 3D printing: Recent developments.* *Mo. Med.* 2018; 115 (1): 75-81.
30. Abdullah K.A., Reed W. *3D printing in medical imaging and healthcare services.* *J. Med. Radiat. Sci.* 2018; 65 (3): 237-239.

31. Smith M.L., Jones J.F.X. *Dual-extrusion 3D printing of anatomical models for education. Anat. Sci. Educ.* 2018;11 (1): 65-72.
32. Smillie R.W., Williams M.A., Richard M., Cosker T. *Producing three-dimensional printed models of the hepatobiliary system from computed tomography imaging data. Ann. R. Coll. Surg. Engl.* 2021; 103 (1): 41-46.
33. Radzi S., Tan H.K.J., Tan G.J.S., et al. *Development of a three-dimensional printed heart from computed tomography images of a plastinated specimen for learning anatomy. Anat. Cell. Biol.* 2020; 53 (1): 48-57.