

ОБЗОРЫ

УДК 617-089.844

**ХИРУРГИЧЕСКОЕ ЛЕЧЕНИЕ ДЕТЕЙ С ВРОЖДЕННЫМИ
ДЕФОРМАЦИЯМИ ГРУДНОГО И ПОЯСНИЧНОГО ОТДЕЛОВ
ПОЗВОНОЧНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ
3D-ПРОТОТИПИРОВАНИЯ**

Бойко А.Е., Кокушин Д.Н., Баиндурашвили А.Г., Виссарионов С.В., Мульдьяров В.П.
*ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии
и ортопедии им. Г.И. Турнера» Минздрава России, Санкт-Петербург, e-mail: lex.trol@mail.ru*

В статье представлен анализ данных отечественных и зарубежных исследований по вопросам актуальности использования в качестве предоперационной подготовки трехмерных технологий моделирования, прототипирования и трехмерной печати навигационных шаблонов при врожденных деформациях грудного и поясничного отделов позвоночника у детей. Был проведен анализ 60 научных публикаций, из них по поставленному вопросу было выбрано 27 статей, из которых 9 публикаций – отечественные, остальные – зарубежные. К основным плюсам использования 3D-прототипирования относятся: повышение точности проведения транспедикулярных винтов (ТВ), что снижает риск их мальпозиции, тем самым предупреждая повреждения содержимого позвоночного канала, со всеми вытекающими последствиями; сокращение времени проведения оперативного вмешательства, а также уменьшение интраоперационной кровопотери, что снижает потребность проведения гемотрансфузии у больных в послеоперационном периоде. Немаловажным дополнительным преимуществом является тактильная ощущаемая напечатанная модель у хирурга во время операции, что позволяет сориентироваться при проведении ТВ в ходе операции. Статистически достоверным и доказанным является факт уменьшения количества снимков, выполненных интраоперационно, тем самым снижая лучевую нагрузку на хирурга и на пациента. При анализе научных публикаций, посвященных 3D-прототипированию в хирургии позвоночника, выяснилось, что применение данной методики стало чаще использоваться в последние годы из-за высокой перспективности и большого потенциала в оперативной ортопедии у детей.

Ключевые слова: врожденная деформация позвоночника, транспедикулярные винты, трехмерная печать, 3D-прототипирование, позвоночник

**SURGICAL TREATMENT OF CHILDREN WITH CONGENITAL
DEFORMITIES OF THE THORACIC AND LUMBAR SPINE
USING 3D PROTOTYPING TECHNOLOGIES**

Boyko A.E., Kokushin D.N., Baidurashvili A.G., Vissarionov S.V., Muldiyarov V.P.
*G.I. Turner National Medical Research Center for Children's Orthopedics and Trauma Surgery,
St. Petersburg, e-mail: lex.trol@mail.ru*

The article presents an analysis of data from domestic and foreign studies on the relevance of using three-dimensional modeling technologies, prototyping and three-dimensional printing of navigation templates for congenital deformities of the thoracic and lumbar spine in children as preoperative preparation. About 60 scientific publications were analyzed, of which 27 articles were selected for the analysis of information on the issues raised, of which 9 were domestic, and the rest were foreign. The main advantages of using 3DP include improving the accuracy of screws, which reduces the risk of their malposition, thereby preventing damage to the contents of the spinal canal, with all the ensuing consequences; reducing the time of surgery, as well as reducing intraoperative blood loss, which allows the patient to recover much faster in the postoperative period. A very important additional advantage is the tactile, sensed printed model of the surgeon during the operation, which allows you to orient yourself for screws during the operation. Statistically reliable and proven is the fact of reducing the number of images performed intraoperatively, thereby reducing the radiation load on the surgeon and on the patient. When analyzing scientific publications devoted to 3D prototyping in spine surgery, the use of this technique has become the most common practice in recent years, as a result of the high prospects and great potential in operative orthopedics in children.

Keywords: congenital deformity of the spine, transpedicular support elements, three-dimensional printing, 3D prototyping, spine

До настоящего времени хирургическое лечение детей с врожденными деформациями грудного и поясничного отделов позвоночника является одной из важных и актуальных проблем детской ортопедии. При хирургическом лечении сколиотической деформации, деформации при нарушениях сегментаций позвонков отмечается тен-

денция к применению металлоконструкции с транспедикулярными опорными элементами. Данные металлоконструкции воздействуют на все три колонны позвоночного столба по сравнению с крючковыми металлоконструкциями, так что представляется возможным добиться большей величины коррекции искривления, стабильной и на-

дежной фиксации, истинного деротационного эффекта позвонков на вершине дуги в ходе операции, а также предупреждения дальнейшего прогрессирования деформации в послеоперационном периоде [1–3]. Однако тотальная, мультисегментарная транспедикулярная фиксация позвонков, особенно в деформированных сегментах верхнегрудного и среднегрудного отделов позвоночника, достаточно сложна и представляет собой ответственный и технически сложный момент вмешательства [3–6]. Возможно развитие различных серьезных осложнений при некорректном проведении ТВ, таких как перфорация и перелом корня дуги позвонка, стеноз позвоночного канала опорными элементами, повреждение твердой мозговой оболочки и спинного мозга, а также травма крупных кровеносных сосудов [6–8]. Как правило, такие осложнения распознаются во время операции или в раннем послеоперационном периоде [9, 10]. Например, бессимптомная перфорация дужки позвонка осложняется пролежнями твердой мозговой оболочки с нарушением ликвородинамики и радикулопатии [11, 12]. Поэтому определение тактики хирургического лечения врожденных деформаций грудного и поясничного отделов позвоночника ставит перед хирургом-ортопедом ряд непростых задач, для решения которых необходим тщательный анализ и предоперационное планирование с применением современных методов диагностики. Одной из важнейших задач, стоящей перед вертебрологом, является наиболее точная визуализация позвоночника пациента для детальной оценки типа аномалии развития, точный выбор зоны фиксации позвонков, оценка возможности инструментации и подбора эффективной тактики дальнейшего вмешательства на позвоночнике у данной группы пациентов [13]. Одними из возможных вариантов решения проблем корректной установки транспедикулярных опорных элементов при хирургическом лечении детей с врожденными деформациями грудного и поясничного отделов позвоночника является использование 2D-флюоронавигации, 3D-флюоронавигации, 3D-КТ навигации с регистрацией по анатомическим ориентирам [3]. В последнее время широкое распространение получила технология 3D-прототипирования, позволяющая создать одноразовый персонализированный хирургический инструмент – навигационный шаблон [9].

С 2013 г. возросла частота применения 3D-печати и в хирургии [14, 15]. В настоящее время выделяют следующие категории

3D-печати в хирургической практике: изготовление протезов и имплантатов, изготовление копий анатомических моделей; изготовление хирургических инструментов для выполнения оперативных пособий [15].

3D-шаблоны могут применяться для визуализации важных анатомических структур и ориентиров; изучения измененных анатомо-антропометрических особенностей тел позвонков в дуге искривления при врожденных деформациях грудного и поясничного отделов позвоночника; симуляции оперативного вмешательства для предупреждения возможных осложнений на операционном столе; предварительного подбора формы хирургических инструментов или их испытания на муляжах. Изучение анатомии измененного органа или сегмента у пациента с помощью напечатанного 3D-навигационного шаблона обладает большим преимуществом перед просмотром снимков той же области на мониторе [15]. Во многих медицинских хирургических специальностях передовых клиник анатомические модели являются незаменимой частью предоперационного планирования [16, 17].

Актуальность использования данного вида предоперационного планирования в хирургии позвоночника у детей определяется рядом причин: наличием у пациентов тяжелых врожденных деформаций позвоночника, нуждающихся в оперативном лечении; хирургические сложности в выполнении операций у детей с резко выраженными изменениями анатомии позвоночника при врожденных деформациях, требующие новых возможностей визуализации по итогам предоперационного обследования; необходимость модернизации существующих методов и поиск новых подходов в лечении детей, примером которых является оперативные вмешательства с использованием 3D-прототипирования.

Персонификация анатомии органа или сегмента достигается благодаря созданию 3D-моделей на основе данных, полученных при помощи различных методов трехмерной медицинской визуализации: мультиспиральная компьютерная томография (МКТ), магнитно-резонансная томография (МРТ), системы лазерного сканирования, позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) и даже фотографии, сделанные при помощи смартфона [18].

Цель данной работы заключается в изучении и оценке данных зарубежных и отечественных научных публикаций с применением 3D-прототипирования в хирургии детей с врожденными деформациями грудного и поясничного отделов позвоночника.

Материалы и методы исследования

Для научного обзора изучено около 60 научных публикаций, представленных анализом данных по применению прототипирования и трехмерной печати в хирургии позвоночника. Среди них было выделено 26, из них 9 – отечественных, остальные публикации – зарубежные, в которых были приведены сведения об использовании трехмерных компьютерных технологий при предоперационном планировании коррекции деформации позвоночника у детей.

Результаты исследования и их обсуждение

В современной отечественной и зарубежной литературе достаточно широко описаны методы хирургического лечения с врожденными деформациями грудного и поясничного отделов позвоночника у детей. Для наиболее полноценной картины состояния ребенка с аномалиями развития позвоночника проводят полный комплекс обследований с применением современных методов лучевой диагностики (рентгенография в двух проекциях, МСКТ, МРТ всех отделов позвоночника). Однако не всегда удается получить полную картину деформации у ребенка для подбора наилучших хирургических техник [13]. Так, в исследовательской работе Y.T. Wang с соавторами (2016) было установлено, что применение индивидуальных 3D-моделей, созданных при помощи 3D-прототипирования, позволяет детально провести предоперационное планирование хирургического вмешательства, тем самым способствуя сокращению времени операции, что позволяет уменьшить операционную травму и интраоперационную кровопотерю. В свою очередь у пациента происходит ускорение послеоперационной реабилитации [19].

В 2016 г. группа авторов провела исследование на тему: «Преимущества и недостатки 3D-печати в хирургии». Авторы анализируют 158 хирургических операций, с использованием 3D-моделирования. 3D-технологии применялись для создания имплантов, для получения анатомических моделей и интраоперационной навигации. Эти цели реализовывались в первую очередь в ортопедических и челюстно-лицевых операциях. Основные преимущества, отмеченные исследователями, – сокращение времени операции. В качестве недостатков отмечены дополнительные расходы и время, требующиеся для создания навигационного шаблона [20]. За последние 5 лет проведено немногочисленное количество научных исследований по теме хирургического лече-

ния врожденных деформаций позвоночника у детей старшего возраста, при которых использовалось предоперационное планирование с использованием 3D-шаблонов [21, 22]. В научных публикациях авторы делятся своим опытом применения 3D-технологий прототипирования для отдельно взятой деформации позвоночника, самой характеристики деформации, и количестве установленных винтов, однако достаточно редко приводят статистические данные о результативности применения [23]. Так в работе Mao et al., где применялся метод предоперационной 3D-реконструкции и быстрого прототипирования, проходили исследования 16 детей со сложными тяжелыми деформациями позвоночника: 3 – идиопатический кифосколиоз, 11 – врожденный сколиоз, 2 ребенка – нервно-мышечный сколиоз. Использование 3D-полистирольных моделей, по мнению авторов, могло бы обеспечить более точную морфометрическую информацию и облегчить хирургическую коррекцию сложной тяжелой деформации позвоночника у детей. Однако никаких исследований по выявлению эффективности технологии 3D-прототипирования у пациентов с подростковым идиопатическим сколиозом не проводилось [23, 24]. В работах Mingyuan Yang, Chao Li проведено ретроспективное исследование по оценке эффективности технологии трехмерного быстрого прототипирования в коррекции деформации позвоночника у 126 пациентов с подростковым идиопатическим сколиозом типа Lenke 1: группа А (n = 50) использовали технологии 3D-прототипирования для создания модели деформированного позвоночника, группа В (n = 76) – ТВ установлены методом «свободной руки». Авторами сделан вывод о значительном сокращении времени операции ($184,32 \pm 4,65$ мин против $212,32 \pm 8,17$ мин, $P < 0,001$), снижении объема интраоперационной кровопотери ($846,68 \pm 26,11$ мл против $1029,65 \pm 72,18$ мл, $P < 0,001$). Данные результаты позволяют рассмотреть вопрос о проведении дальнейших исследований для выяснения эффективности метода предоперационного планирования [23]. В исследованиях Yi-Tian Wang с соавторами (2016) представлены описания четырех клинических случаев заболеваний позвоночника у детей: врожденный сколиоз, новообразование атланта, атлантаксиальный вывих и переломовывих атлантаксиального сочленения. При использовании 3D-моделей уменьшается время операции и интраоперационной кровопотери, предоставляется лучшая визуальная и тактильная информация, а также корректно и безопасно проводятся транспе-

дикулярные опорные элементы [25]. По результатам многочисленных литературных данных, величина мальпозиции винтов в грудном и поясничном отделах позвоночника у детей при коррекции деформации составляет огромный разброс – от 1 до 58% в случаях использования методики «свободной руки» [13]. В исследованиях Д.Н. Кокушина с соавторами (2018) описан метод применения технологии 3D-прототипирования у детей с врожденными деформациями поясничного отдела позвоночника с использованием шаблонов-направителей (ШН). Использование ШН дополнительно к 3D-моделированию способствовало повышению частоты корректной установки ТВ до 96,3% к 78,8% установки методом «свободной руки» ($p = 0,011$). Полученные результаты их применения *in vitro* показали высокую точность и корректность установки ТВ, что дает перспективы использования данной методики в клинической практике у детей раннего возраста с врожденным сколиозом [26].

В исследовании А.А. Снеткова с соавторами (2020) проведена оценка использования аддитивных технологий при хирургии тяжелых врожденных деформаций позвоночника у 20 пациентов от 4 до 19 лет. Пациенты разделены на 2 группы: группа А – проводили стандартную предоперационную подготовку, в группе В – предоперационная подготовка проводилась с использованием предварительно изготовленной 3D-модели позвоночника. Авторами отмечено, что в группе В значительно снижено время, затраченное на проведение ТВ; гораздо меньше травматизация костной структуры при формировании канала при измененной анатомии, что снижает риск повреждения сосудисто-нервного пучка и спинного мозга. Авторы убеждены, что при данном предоперационном планировании количество снимков, сделанных интраоперационно с помощью электронно-оптического преобразователя, гораздо меньше, чем без 3D-моделирования, снижая при этом лучевую нагрузку на оперируемого и оперирующего. Одним из преимуществ 3D-шаблона является возможность тактильного ощущения хирургом напечатанной модели, что позволяет лучше сориентироваться для проведения ТВ в ходе операции, особенно это касается сложной измененной анатомии позвоночника у детей, характерной для врожденной деформации грудного и поясничного отделов [13].

Заключение

Анализ отечественной и зарубежной научной литературы показал достаточно огра-

ниченное использование и применение технологий 3D-прототипирования и 3D-печати при деформациях позвоночника у детей. Данные работ свидетельствуют об увеличении корректности установки ТВ в позвонки и уменьшении количества их мальпозиций, отмечено сокращение времени оперативного вмешательства и объема интраоперационной кровопотери. Использование 3D-прототипирования дает хирургу возможность тактильного ощущения напечатанной модели, позволяя получить более точное представление о сложной и измененной анатомии позвоночника при врожденной деформации грудного и поясничного отделов у детей. Использование навигационных шаблонов позволяет уменьшить лучевую нагрузку как на хирурга, так и на пациента. Применение технологий 3D-прототипирования в хирургии позвоночника у детей в последние годы получает всё большее распространение, что свидетельствует о перспективности и большом потенциале данного метода.

Список литературы

1. Виссарионов С.В., Кокушин Д.Н., Беляничков С.М. Хирургическое лечение деформаций позвоночника у детей с идиопатическим сколиозом транспедикулярными спинальными системами: пособие для врачей. СПб., 2014. С. 46.
2. Виссарионов С.В., Беляничков С.М., Кокушин Д.Н., Мурашко В.В. Результаты коррекции деформации позвоночника транспедикулярными спинальными системами у детей с идиопатическим сколиозом // Хирургия позвоночника. 2013. № 3. С. 30–37.
3. Виссарионов С.В., Кокушин Д.Н., Дроздецкий А.П., Беляничков С.М. Технология использования 3D-КТ навигации в хирургическом лечении детей с идиопатическим сколиозом // Хирургия позвоночника. 2012. № 1. С. 41–47.
4. Boss N., Webb J.K. Pedicle screw fixation in spinal disorders: a European view. Eur. Spine J. 1997. vol. 6. no. 1. P. 2–18. DOI: 10.1007/BF01676569.
5. Gaines RW. The use of pedicle-screw internal fixation for the operative treatment of spinal disorders. J. Bone Joint Surg. Am. 2000. vol. 82. No. 10. P. 1458–1476. DOI: 10.2106/00004623-200010000-00013.
6. Modi H.N., Suh S.W., Hong J.Y. Accuracy of thoracic screw using ideal pedicle entry point in severe scoliosis. Clin. Orthop. Relat. Res. 2010. vol. 468. P. 1830–1837. DOI: 10.1007/s11999-010-1280-1
7. Takahashi J., Hirabayashi H., Hashidate H., Ogihara N., Kato H., Accuracy of multilevel registration in image-guided pedicle screw insertion for adolescent idiopathic scoliosis. Spine. 2010. vol. 35. no. 3. P. 347–352. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181b77f0a.
8. Виссарионов С.В. Технологии коррекции деформаций позвоночника транспедикулярными спинальными системами у детей с идиопатическим сколиозом // Хирургия позвоночника. 2013. № 1. С. 21–27.
9. Косулин А.В., Елякин Д.В., Лебедева К.Д., Сухомлинова А.Е., Козлова Е.А. Применение навигационного шаблона для прохождения ножки позвонка при транспедикулярной фиксации // Педиатр. 2019. Т. 10. № 3. С. 45–50.
10. Tsai T.T., Lee S.H., Niu C.C., Lai P.L., Chen L.H., Chen W.J. Unplanned revision spinal surgery within a week: a retrospective analysis of surgical causes. BMC Musculoskeletal Disord. 2016. vol. 17. no. 28. DOI: 10.1186/s12891-016-0891-4.

11. Floccari L.V., Larson A.N., Stans A.A., Fogelson J., Helenius I. Delayed dural leak following posterior spinal fusion for idiopathic scoliosis using all posterior pedicle screw technique. *J. Pediatr. Orthop.* 2017. vol. 37. no. 7. P. e415-e420. DOI: 10.1097/BPO.0000000000001008.
12. Woo E.J., DiCuccio M.N. Clinically significant pedicle screw malposition is an underestimated cause of radiculopathy. *Spine J.* 2018. vol. 18. no. 7. P. 1166–1171. DOI: 10.1016/j.spinee.2017.11.006.
13. Снетков А.А., Горбатюк Д.С., Пантелеев А.А., Еськин Н.А., Колесов С.В. Анализ применения 3D-прототипирования при хирургической коррекции врожденных кифосколиозов // *Хирургия позвоночника.* 2020. № 17 (1). С. 42–53.
14. Коваленко Р.А., Пташников Д.А., Черebilло В.Ю., Руденко В.В., Кашин В.А. Применение индивидуальных 3D-навигационных матриц для транспедикулярной фиксации субаксиальных шейных и верхнегрудных позвонков // *Хирургия позвоночника.* 2019. № 16 (2). С. 35–41.
15. Николаенко А.Н. Применение 3D-моделирования и трехмерной печати в хирургии (обзор литературы) // *Medline.Ru.* 2018. № 18. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.medline.ru/public/art/tom19/art2.html> (дата обращения: 15.05.2020).
16. Lee M., Wu B.M. Recent advances in 3D printing of tissue engineering scaffolds. *Methods Mol Biol.* 2012. vol. 868. P. 257–267. DOI: 10.1007/978-1-61779-764-4_15.
17. Romano P.E. 3D Printing Surgical Models of Organs; or Lunch; Phone Screens; How To Do It (3D) Yourself; Computers that Track Your Eyes and Take Eye Commands. *Binocul Vis Strabolog Q Simms Romano.* 2013. vol. 28. no. 2. P. 121–128.
18. Kim G.B., Lee S., Kim H., Yang D.H., Kim Y.H., Kyung Y.S., Kim C.S., Choi S.H., Kim B.J., Ha H., Kwon S.U., Kim N. Three-Dimensional Printing: Basic Principles and Applications in Medicine and Radiology. *Korean Journal of Radiology.* 2016. vol. 17. no. 2. P. 182. DOI: 10.3348/kjr.2016.17.2.182.
19. Wang Y.T., Yang X.J., Yan B., Zeng T.H., Qiu Y.Y., Chen S.J. Clinical application of three-dimensional printing in the personalized treatment of complex spinal disorders. *Chin. J. Traumatol.* 2016. vol. 19. no. 1. P. 31–34. DOI: 10.1016/j.cjtee.2015.09.009.
20. Martelli N., Serrano C., van den Brink H., Pineau J., Prognon P., Borget I., El Batti S. Advantages and disadvantages of 3-dimensional printing in surgery: A systematic review. *Surgery.* 2016. vol. 159 no. 6. P. 1485–1500. DOI: 10.1016/j.surg.2015.12.017.
21. Takemoto M., Fujibayashi S., Ota E., Otsuki B., Kimura H., Sakamoto T., Kawai T., Futami T., Sasaki K., Matsushita T., Nakamura T., Neo M., Matsuda S. Additive-manufactured patient-specific titanium templates for thoracic pedicle screw placement: novel design with reduced contact area. *Eur. Spine J.* 2016. vol. 25. no. 6. P. 1698–1705. DOI: 10.1007/s00586-015-3908-z.
22. Liu K., Zhang Q., Li X., Zhao C., Quan X., Zhao R., Chen Z., Li Y. Preliminary application of a multi-level 3D printing drill guide template for pedicle screw placement in severe and rigid scoliosis. *Eur Spine J.* 2017. vol. 26. no. 6. P. 1684–1689. DOI: 10.1007/s00586-016-49261.
23. Yang M., Li C., Li Y., Zhao Y., Wei X., Zhang G., Fan J., Ni H., Chen Z., Bai Y., Li M. Application of 3D Rapid Prototyping Technology in Posterior Corrective Surgery for Lenke 1 Adolescent Idiopathic Scoliosis Patients. *Medicine (Baltimore).* 2015 Feb. vol. 94. No. 8. P. 582. DOI: 10.1097/MD.0000000000000582.
24. Mao K., Wang Y., Xiao S., Liu Z., Zhang Y., Zhang X., Wang Z., Lu N., Shourong Z., Xifeng Z., Geng C., Baowei L. Clinical application of computer-designed polystyrene models in complex severe spinal deformities: a pilot study. *Eur. Spine J.* 2010. vol. 19. no. 5. P. 797–802. DOI: 10.1007/s00586-010-1359-0.
25. Wang Y.T., Yang X.J., Yan B., Zeng T.H., Qiu Y.Y., Chen S.J. Clinical application of three-dimensional printing in the personalized treatment of complex spinal disorders. *Chin. J. Traumatol.* 2016 Feb. vol. 19. no. 1. P. 31–34. DOI: 10.1016/j.cjtee.2015.09.009.
26. Кокушин Д.Н., Виссарионов С.В., Баиндурашвили А.Г., Овечкина А.В., Познович М.С. Сравнительный анализ положения транспедикулярных винтов у детей с врожденным сколиозом: метод «свободной руки» (*in vivo*) и шаблоны-направители (*in vitro*) // *Травматология и ортопедия России.* 2018. Т. 24. № 3. С. 53–63. DOI: 10.21823/2311-2905-2018-24-4-53-63.