

**АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ХИРУРГИИ ДЕФОРМАЦИЙ ПОЗВОНОЧНИКА**

А.А. Кулешов¹, М.С. Ветрилэ^{1*}, А.Н. Шкарубо², В.В. Доценко¹, Н.А. Еськин¹, И.Н. Лисянский¹,
С.Н. Макаров¹

¹ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова» Минздрава России, Москва, Россия; ²ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия

Цель исследования: обобщение собственного опыта применения метода трехмерного биомоделирования и изготовления индивидуальных металлоконструкций при оперативном лечении деформаций позвоночника различной локализации и этиологии, оценка его преимуществ, возможностей и эффективности.

Пациенты и методы. В период с 2011 по 2018 г. трехмерные модели позвоночника были изготовлены для 52 пациентов с различными деформациями позвоночника: с врожденной многоплоскостной деформацией позвоночника (n=20), с деформацией верхней шейной области позвоночника (n=12), со спондилолистезом III–IV степени (n=10), с нейрогенным сколиозом (n=8), с нейрофиброматозом (n=2). Трехмерные модели изготавливали в масштабе 1:1 методом стереолитографии на основании компьютерной модели, выполненной по данным спиральной компьютерной томографии. Во всех случаях трехмерные модели использовали для предоперационного планирования, включая предполагаемую коррекцию деформации, декомпрессию и фиксацию позвоночника. На основании выполненных трехмерных моделей позвоночника в 26 случаях были изготовлены индивидуальные металлоконструкции для коррекции деформации и фиксации соответствующего отдела позвоночника: пластины для передней фиксации верхней шейной области позвоночника, шейно-грудного перехода, пластины и кейджи для фиксации пояснично-крестцового отдела позвоночника и имплантаты для выполнения позвоночно-тазового фиксации.

Результаты. Во всех случаях применение биомоделей позвоночника позволило получить существенную дополнительную информацию как при предоперационном планировании, так и во время операции. Отдаленный период наблюдения за пациентами составил 3 года. У всех пациентов операции по декомпрессии нервных структур и коррекции деформаций дали хорошие клинические и рентгенологические результаты. Применение индивидуальных имплантатов позволило достичь стабильной фиксации позвоночника во всех случаях, за исключением 3, в которых пришлось удалить имплантаты из-за инфекционных осложнений (n=1) и проблем с заживлением послеоперационной раны (n=2). **Заключение.** Полноразмерные объемные модели позвоночника при деформациях различной этиологии позволяют более полно оценить характер деформации, выполнять предоперационное планирование. Трехмерные объемные модели и компьютерное моделирование делают возможным изготовление индивидуальных металлоконструкций для фиксации позвоночника, что особенно актуально при тяжелых деформациях позвоночника.

Ключевые слова: аддитивные технологии, стереолитография, деформация позвоночника, 3D-печать, индивидуальные имплантаты

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Источник финансирования: без грантовой поддержки

КАК ЦИТИРОВАТЬ: Кулешов А.А., Ветрилэ М.С., Шкарубо А.Н., Доценко В.В., Еськин Н.А., Лисянский И.Н., Макаров С.Н. Аддитивные технологии в хирургии деформаций позвоночника. Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2018;3-4:19-29. <https://doi.org/10.17116/vto201803-04119>

ADDITIVE TECHNOLOGIES IN SURGICAL TREATMENT OF SPINAL DEFORMITIES

А.А. Kuleshov¹, М.С. Vetrile^{1*}, А.Н. Shkarubo², В.В. Docenko¹, Н.А. Es'kin¹, И.Н. Lisyanskiy¹,
С.Н. Makarov¹

¹N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopaedics, Moscow, Russia;

²N.N. Burdenko National Scientific and Practical Center for Neurosurgery, Moscow, Russia

Purpose of study: to summarize the experience in three-dimensional biomodeling and custom made metal constructions for surgical treatment of spinal deformities of different localization and etiology, evaluate its advantages, potentialities and efficacy.

Patients and methods. During the period from 2011 to 2018 three-dimensional (3D) custom-made spinal models were used in 52 patients with different spinal deformities: congenital multilevel spinal deformity (n=20), upper cervical spine deformities (n=12), III–IV degree of spondylolisthesis (n=10), neurogenic scoliosis (n=8), neurofibromatosis (n=2). 3D models were created in scale 1:1 by stereolithographic technique on the basis of computer model designed by spiral CT results. In all cases 3D models were used for preoperative planning including the intended deformity correction, decompression and spine fixation. In 26 cases 3D spinal models were used to manufacture the custom made metal constructions for the deformity correction and spine fixation: plates for the upper cervical spine anterior fixation, cervicothoracic junction, plates and cages for lumbosacral fixation, and implants for spinopelvic fixation.

Results. In all cases the use of spine bio models enabled to achieve important additional information at preoperative planning and intraoperatively. Long-term follow up made up 3 years. After neural structures decompression and deformity correction good clinical and roentgenologic results were observed in all patients.

Use of custom made implants ensured stable spine fixation in all cases with the exception of 3 patients in whom the implants were removed due to infectious complication (n=1) and poor postoperative wound healing.

Conclusion. In deformities of different etiology the full-scale spine models provide better assessment of the deformity pattern and preoperative planning. 3D models and computer modeling make possible the manufacture of individual metal constructions for spine fixation that is especially topical in severe deformities.

Key words: additive technologies, stereolithography, spine deformity, 3D-printing, custom made implants

Conflict of interest: the authors state no conflict of interest

Funding: the study was performed with no external funding

TO CITE THIS ARTICLE: Kuleshov AA, Vetrile MS, Shkarubo AN, Docenko VV, Es'kin NA, Lisyanskiy IN, Makarov SN. Additive technologies in surgical treatment of spinal deformities. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2018;3-4:19-29. (In Russ.). <https://doi.org/10.17116/vto201803-04119>

Аддитивные технологии (additive manufacturing) относятся к одному из быстрорастущих сегментов современной промышленности, который все чаще находит применение в медицине. К аддитивным технологиям относится биомоделирование — создание высокоточной виртуальной или реальной модели интересующей области человеческого организма на основе данных лучевой диагностики, как правило, компьютерной томографии (КТ). Применение трехмерных моделей показало высокую эффективность в различных областях медицины — в челюстно-лицевой хирургии, нейрохирургии, ортопедии [1–4]. Применение биомоделирования в травматологии и ортопедии, и в частности в вертебрологии, позволяет более четко визуализировать характер деформаций скелета, осуществлять предоперационное планирование, подбор имплантатов [4–7]. В зарубежной литературе имеются сообщения о трехмерной печати как индивидуальных анатомических моделей, так и индивидуальных имплантатов, протезов и др. В отечественной литературе есть лишь единичные сообщения о применении аддитивных технологий в изготовлении индивидуальных имплантатов в хирургии позвоночника [8–11].

Цель исследования: обобщение собственного опыта применения метода трехмерного биомоделирования и изготовления индивидуальных металлоконструкций при оперативном лечении деформаций позвоночника различной локализации и этиологии, оценка его преимуществ, возможностей и эффективности.

ПАЦИЕНТЫ И МЕТОДЫ

Компьютерное моделирование и лазерная стереолитография у пациентов, нуждающихся в операциях на позвоночнике, применяются нами с 2011 г. С 2011 по 2018 г. выполнено 52 модели позвоночника для пациентов с различной патологией: с врожденной многоплоскостной деформацией позвоночника ($n=20$), деформацией верхнешейного отдела позвоночника ($n=12$), спондилолистезом III–IV степени ($n=10$), нейрогенным сколиозом ($n=8$); для 2 пациентов с нейрофиброматозом и вторичной деформацией пояснично-крестцового отдела позвоночника изготовлены модели пояснично-крестцового отдела и части подвздошных костей.

Трехмерные модели изготавливали в масштабе 1:1 методом стереолитографии на основании выполненной по данным спиральной КТ компьютерной модели. КТ-сканирование проводили с толщиной среза не более 1 мм. Результаты КТ, сохраненные в файлах медицинского изображения DICOM, пересылали на предприятие ООО «Конмет» (Россия), где осуществлялись подготовка компьютерной трехмерной модели и техническое изготовление непосредственно самих объемных моделей.

Во всех случаях трехмерные модели использовали для предоперационного планирования, включая предполагаемую коррекцию деформации, декомпрессию невралических структур и фиксацию позвоночника. В ряде случаев при тяжелых врожденных деформациях позвоночника трехмерные модели стерилизовали и применяли непосредственно во время операции, чтобы лучше ориентироваться в аномальной анатомии позвоночника.

В 1 случае у пациента с краниовертебральной дисплазией и ротационным подвывихом позвонка C_1 на основании трехмерной модели были выполнены направляющие для проведения винтов в позвонки C_1 и C_{II} (рис. 1).

Индивидуальные металлоконструкции на основании данных трехмерного моделирования. На основании полученных трехмерных моделей позвоночника в 26 случаях были выполнены индивидуальные металлоконструкции для коррекции деформации и фиксации соответствующего отдела позвоночника. Все имплантаты были изготовлены на предприятии «Конмет», материалом во всех случаях служил титан Ti-6Al-4V ELI.

Для 7 пациентов с патологией верхнешейного отдела позвоночника различной этиологии были изготовлены индивидуальные пластины для передней фиксации позвонков: C_1-C_{II} ($n=4$, рис. 2, а, б), C_1-C_{III} ($n=2$, рис. 2, в–д) и C_1-C_{IV} ($n=1$; рис. 2, е). На все изготовленные пластины получены патенты Российской Федерации на изобретение [12–15].

Для 4 пациентов изготовлены индивидуальные имплантаты для передней фиксации области шейно-грудного перехода. Во всех случаях имела грубая кифотическая деформация шейно-грудного перехода, в 2 случаях — в сочетании со стенозом позвоночного канала и неврологической симптоматикой (рис. 3). Нозология у данных пациентов была

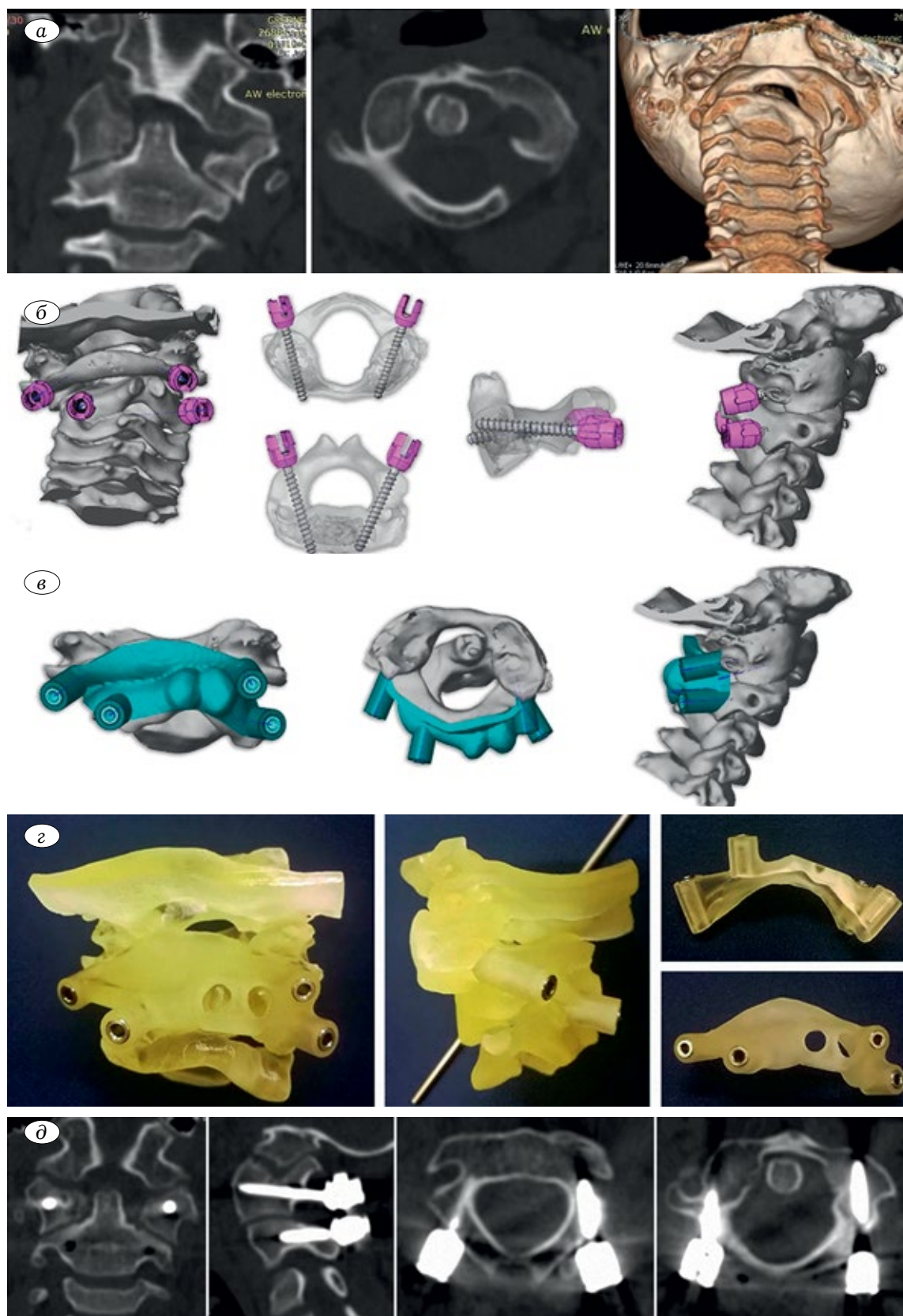


Рис. 1. Дисплазия шейного отдела позвоночника, ротационный подвывих позвонка C_1 у пациента Г., 8 лет.
а — данные КТ до операции, дислокация позвонка C_1 ; **б** — компьютерное моделирование положения винтов; **в** — компьютерное моделирование шаблонов для введения винтов; **г** — стереолитографическая модель с шаблонами; **д** — данные КТ после операции, правильное положение винтов в позвонках C_1 и C_2 , устранение смещения позвонка C_1 .

Fig. 1. Cervical spine dysplasia, C1 rotatory subluxation in patient G., 8 years old.
a — preoperative CT, C1 dislocation; **б** — computer modeling of screw position; **в** — computer modeling of templates for screw insertion; **г** — stereolithographic model with templates; **д** — postoperative CT, proper position of screws within C1 and C2, elimination of C1 dislocation.

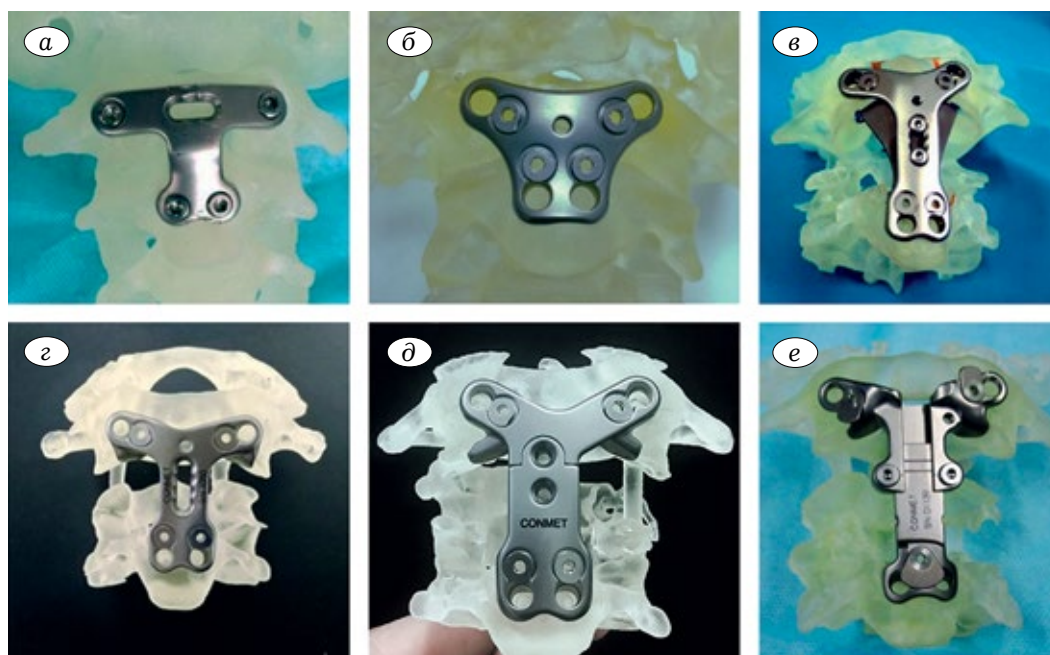


Рис. 2. Различные виды пластин для передней атлантаоаксиальной и атлантосубаксиальной фиксации позвоночника. Объяснения в тексте.

Fig. 2. Different types of plates for anterior atlantoaxial and atlantosubaxial spine fixation. Explanations in the text.

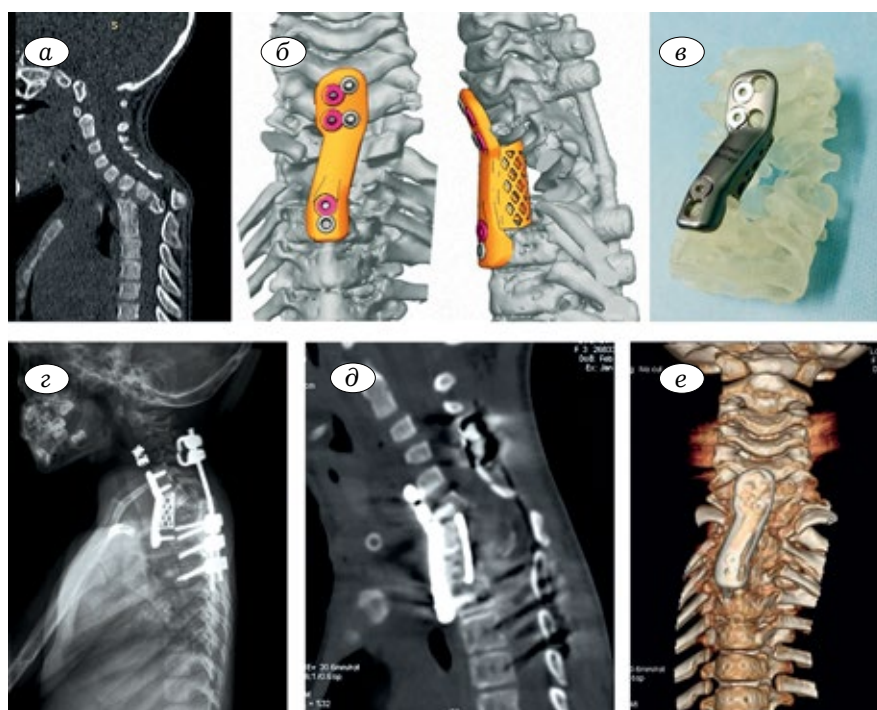


Рис. 3. Аномалия развития шейного и грудного отделов позвоночника, синдром Клиппель-Фейля, врожденный вывих позвонка Th₁, шейно-грудная инклинация со стенозом позвоночного канала, миелопатия у пациентки Л., 3 лет. а — данные КТ до операции; б — компьютерное моделирование пластины с телозамещающим имплантатом; в — стереолитографическая модель и пластина с телозамещающим имплантатом; г-е — рентгенограмма и данные КТ после хирургического лечения.

Fig. 3. Abnormality of cervical and thoracic spine development, Klippel-Feil syndrome, congenital Th 1 dislocation, thoracic cervical inclination with spinal canal stenosis, myelopathy in patient L., 3 years old.

а — preoperative CT; б — computer modeling of the plate with body replacement implant; в — stereolithographic model and plate with body replacement implant; г-е — postoperative roentgenogram and CT.

различной: врожденная аномалия развития позвоночника, спондилоэпифизарная дисплазия и постламинэктомическая деформация.

У 1 пациента с нейрофиброматозом имелись нейрофибромы в области крестца, обусловившие истончение костной ткани крестца и тазовых костей, что привело к нарушению опорной функции крестца. По стереолитографическим моделям были спроектированы и изготовлены индивидуальные имплантаты для позвоночно-тазовой фиксации. Данные имплантаты имеют форму протяженных пластин, изготовленных таким образом, что внутренние контактные поверхности плотно прилегают к гребню подвздошной кости и части наружной и внутренней поверхности подвздошной кости. Точное анатомиче-

ское соответствие имплантатов и подвздошной кости позволяет осуществить стабильную опорную фиксацию позвоночника посредством соединения стандартно установленной на нем металлоконструкции с опорными тазовыми пластинами (рис. 4) [16, 17].

Аналогичные металлоконструкции были изготовлены на основании трехмерных моделей у 4 пациентов с нейромышечным сколиозом, сопровождающимся декомпенсацией баланса туловища и перекосом таза. В 10 случаях у пациентов со спондилолистезом III–IV степени, которым первым этапом выполнялась дорсальная декомпрессия невралных структур с частичным вправлением смещенного позвонка, были спроектированы и выполнены на основании трехмерных моделей

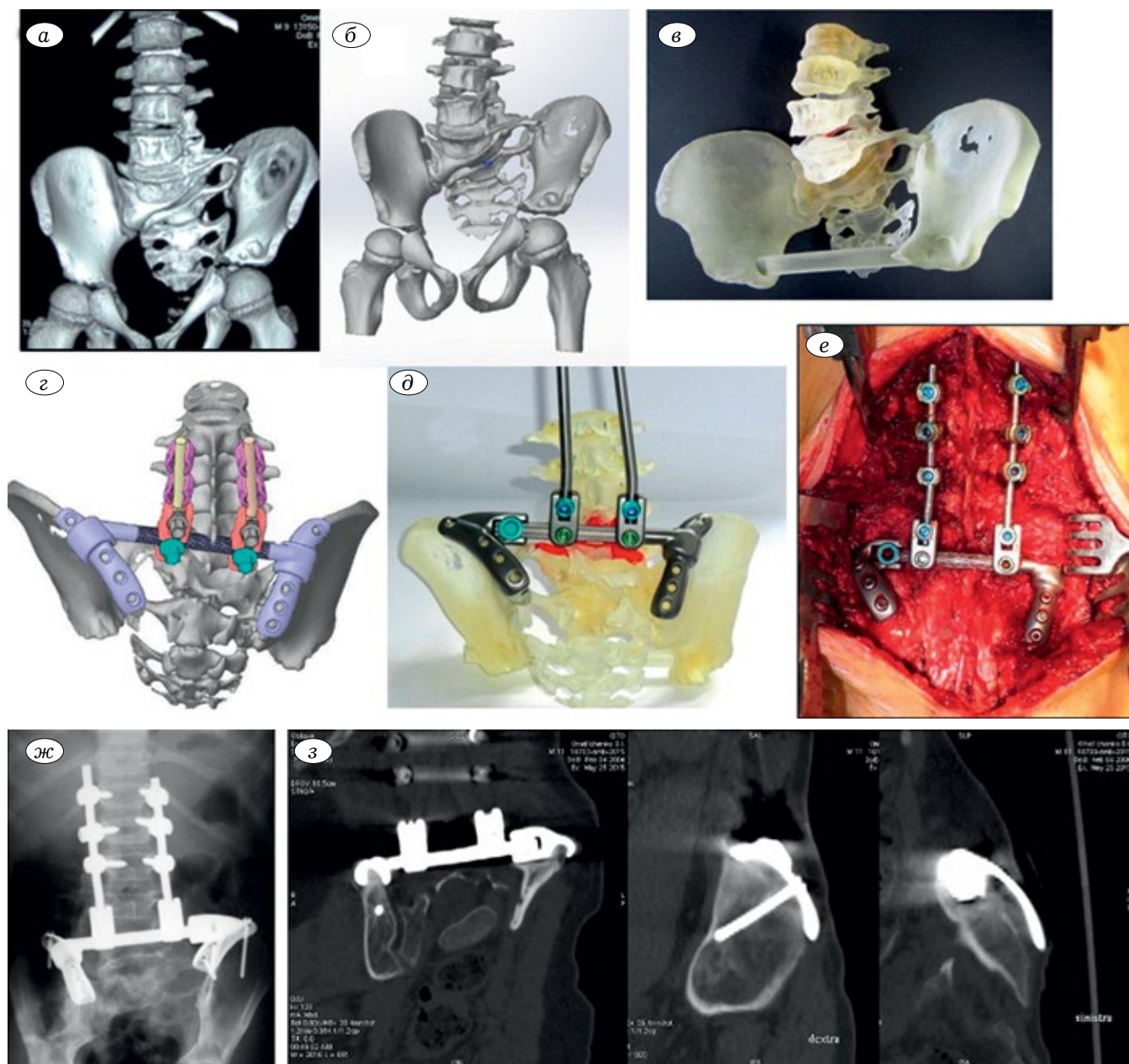


Рис. 4. Нейрофиброматоз, деформация пояснично-крестцового отдела позвоночника, атрофия от давления позвонка L_v, крестца и костей таза у пациента О., 9 лет.

а — КТ-реконструкция пояснично-крестцового отдела позвоночника и таза; б — компьютерная модель; в — стереолитографическая модель; г — компьютерное моделирование индивидуального имплантата для выполнения позвоночно-тазовой фиксации; д — симуляционная операция: установка индивидуального имплантата на объемную модель; е — установка имплантата во время операции; рентгенограмма (ж) и данные КТ (з) после выполнения позвоночно-тазовой фиксации индивидуальным имплантатом.

Fig. 4. Neurofibromatosis, lumbosacral spine deformity atrophy due to L₅, sacrum and pelvic bones compression in patient O., 9 years old. а — CT-reconstruction of lumbosacral spine and pelvis; б — computer model; в — stereolithographic model; г — computer modeling of custom made implant for spinopelvic fixation; д — simulation operation: placement of the custom made implant on the 3D model; е — intraoperative insertion of the implant; roentgenogram (ж) and CT (з) after spinopelvic fixation with custom made implant.

индивидуальные пластины ($n=2$) и цилиндрические кейджи ($n=8$), при помощи которых вторым этапом выполнена передняя фиксация позвонков L_v–S_I (рис. 5).

Кроме перечисленных, все изготовленные объемные биомодели позвоночника использовались в качестве обучающего материала для ординаторов и аспирантов. Биомодели шейного отдела позвоночника служили также материалом для эксперимен-

тальной работы по изучению различных методов инструментальной фиксации позвонков C_I–C_{II} [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Во всех случаях применение биомodelей позвоночника позволило получить существенную дополнительную информацию как при предоперационном планировании, так и во время операции. Планирование объема декомпрессии и остеотомии на трех-

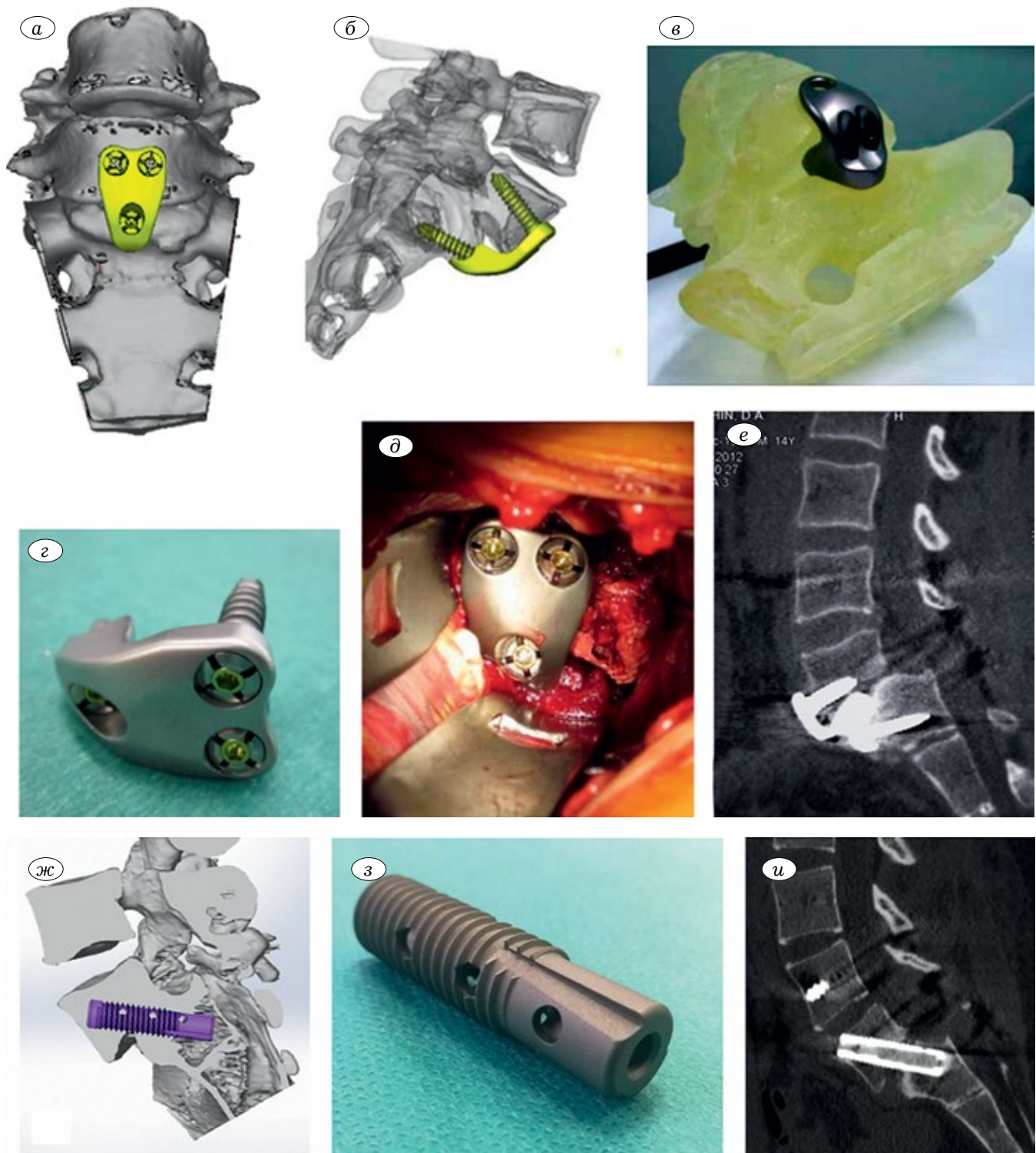


Рис. 5. Индивидуальные имплантаты, применяемые при лечении спондилолистеза.

a — компьютерное моделирование индивидуальной передней пластины L_5-S_1 ; *б* — стереолитографическая модель с установленной пластиной; *в* — интраоперационный вид после установки пластины; *г*, *з* — данные КТ после установки пластины L_5-S_1 ; *д* — компьютерное моделирование индивидуального кейджа L_5-S_1 ; внешний вид кейджа (*е*, *и*) и данные КТ после его установки (*ж*).

Fig. 5. Custom made implants for spondylolisthesis.

a — computer modeling of the custom made L_5-S_1 anterior plate; *б* — stereolithographic model with the mounted plate; *в* — intraoperative plate placement; *г* — CT after L_5-S_1 plate placement; *д* — computer modeling of the custom made L_5-S_1 cage; view of the cage (*е*) and CT after its placement (*ж*).

мерных моделях было, на наш взгляд, полезным при выполнении операций, особенно в случае тяжелых деформаций позвоночника и сложных анатомических взаимоотношений.

Изготовленные для пациента с дисплазией краниовертебральной области и ротационным подвывихом специальные направляющие для установки винтов позволили выполнить успешную

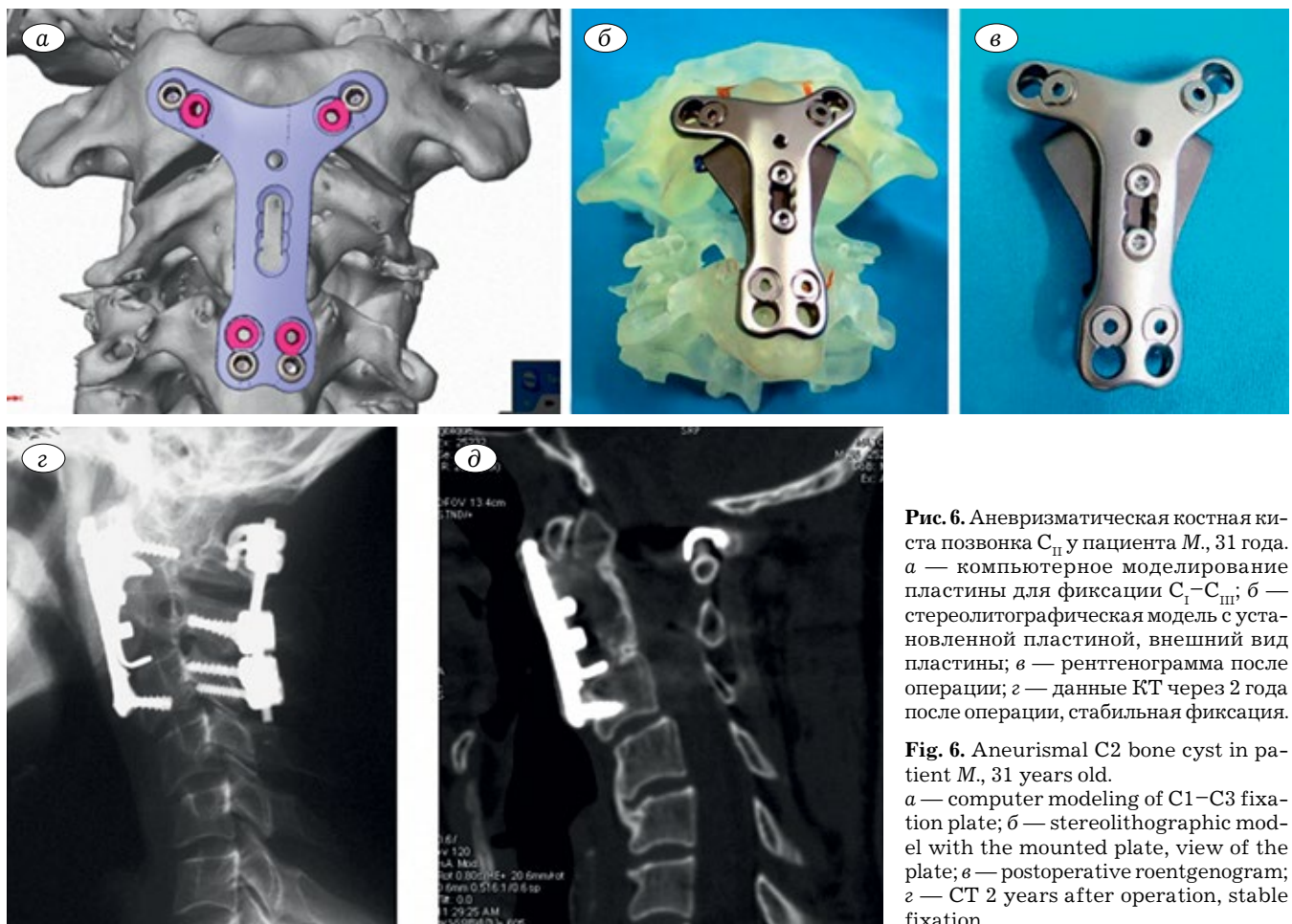


Рис. 6. Аневризматическая костная киста позвонка C_2 у пациента М., 31 года. *а* — компьютерное моделирование пластины для фиксации C_1 – C_3 ; *б* — стереолитографическая модель с установленной пластиной, внешний вид пластины; *в* — рентгенограмма после операции; *г* — данные КТ через 2 года после операции, стабильная фиксация.

Fig. 6. Aneurysmal C2 bone cyst in patient M., 31 years old. *a* — computer modeling of C1–C3 fixation plate; *b* — stereolithographic model with the mounted plate, view of the plate; *в* — postoperative roentgenogram; *г* — CT 2 years after operation, stable fixation.

фиксацию позвонков C_1 – C_2 и устранить вывих (см. рис. 1).

Ввиду разнородности клинического материала и используемых технологий, а также выраженных индивидуальных особенностей в каждом клиническом случае анализ результатов не носит обобщающий характер.

Применение индивидуально изготовленных имплантатов. На основании моделей позвоночника для 26 пациентов изготовлены индивидуальные металлоконструкции и проведена симуляция операции и установки металлоконструкции *in vitro*. Это позволило оптимизировать ход операции и установку фиксирующих имплантатов.

Отдаленный период наблюдения за пациентами составил 3 года (от 3 мес до 5 лет).

У 7 пациентов с патологией верхнешейного отдела позвоночника, которым после проведения декомпрессии осуществлялась передняя фиксация индивидуально изготовленными пластинами, достигнута полная декомпрессия спинного мозга со стабильной фиксацией краниовертебрального отдела позвоночника. В 2 случаях передние пластины пришлось удалить: в одном случае в ближайшем послеоперационном периоде из-за проблем с заживлением задней стенки глотки; во втором случае через 7 лет после операции в связи с развитием нестабильности фиксации и воспалительным процессом. В остальных случаях наблюда-

ется стабильная фиксация верхнешейного отдела позвоночника (рис. 6).

У пациентов с кифотической деформацией шейно-грудного перехода достигнута стабильная передняя фиксация позвоночника, которая наряду с полноценной декомпрессией и задней фиксацией позволила получить хороший клинический результат на сроке наблюдения 2 года (см. рис. 3).

У всех прооперированных пациентов со спондилолистезом позвонка L_5 с применением передних индивидуальных пластин и кейджей достигнута стабильная фиксация пояснично-крестцового отдела позвоночника с отличным клиническим и функциональным результатом (см. рис. 5).

Во всех случаях, за исключением одного, применение индивидуальных опорных пластин позволило получить стабильную позвоночно-тазовую фиксацию, срок наблюдения за пациентами составил 4 года (см. рис. 4). В 1 случае у пациентки с нейромышечным сколиозом после неоднократных операций по поводу менингомиелоцеле пояснично-крестцовой области имплантаты пришлось удалить из-за проблем с заживлением послеоперационной области в ближайшем послеоперационном периоде и присоединением воспалительного процесса.

ОБСУЖДЕНИЕ

Технология «трехмерной печати» появилась в конце 80-х годов прошлого века. Первые лазерные

машины — сначала стереолитографические, затем порошковые, были дорогими, а выбор модельных материалов весьма ограничен. В связи с этим до середины 90-х годов технология применялась главным образом в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности. Однако широкое распространение цифровых технологий в области проектирования (CAD — Computer Aided Design) стимулировало взрывной характер развития технологий 3D-печати. Это способствовало внедрению технологии трехмерной печати во многие области производства, в том числе в медицину.

Первой публикацией, посвященной применению трехмерной модели в медицинской практике, считается работа Н. Tonner в 1979 г. [19]. Автор, используя срезы КТ, изготовил модель таза у пациента с фибросаркомой. Так как метод трехмерной печати в то время еще не был разработан, модель была изготовлена путем послойной склейки вырезанных из полиэстеровой пены частей на основании КТ-срезов. Выполненную таким образом модель таза в масштабе 1:1 автор успешно использовал для создания индивидуального замещающего имплантата.

Первым аддитивным методом изготовления трехмерных моделей стала стереолитография. Это технология, при которой происходит послойное затвердевание жидкой фотополимерной смолы под воздействием луча лазера. Первое сообщение о применении данного метода для создания биомодели анатомических структур человека принадлежит N. Mankovich и соавт. [20].

Челюстно-лицевая хирургия стала первой областью медицины, в которой начали использовать аддитивные технологии [21, 22].

В России метод прототипирования трехмерных объектов на основе CAD-технологий был разработан в Институте проблем лазерных и информационных технологий РАН (Шатура, Московская обл.) под руководством академика РАН В.Я. Панченко [23].

Как и у зарубежных коллег, первые публикации в России о практическом использовании стереолитографического биомоделирования связаны с пластикой посттравматических дефектов костей черепа [1, 2]. Уже опубликовано большое количество статей отечественных авторов, посвященных применению метода биомоделирования и изготовлению индивидуальных имплантатов в нейрохирургии и челюстно-лицевой хирургии [2, 24]. Однако работы по использованию аддитивных технологий в хирургии позвоночника в отечественной литературе носят единичный характер [8–11].

Впервые опыт применения 3D-моделей в хирургии позвоночника представила группа авторов из Австралии [25]. Своим опытом биомоделирования позвоночника поделились и исследователи из Голландии [26]. Модели изготавливали на основании данных КТ из блоков полиуретановой пены на фрезерных станках с числовым программным управлением. Основываясь на 6 клинических наблюдениях, авторы вывели ряд основных требований к биомоделям, среди которых следующие:

3D-модели должны выполняться только в сложных клинических ситуациях, когда такие методы, как КТ и магнитно-резонансная томография, не дают достаточно информации для принятия решения; изготовление моделей не должно затягивать предоперационный период и тем самым увеличивать риск ухудшения состояния пациента; трехмерные модели должны позволять точное предоперационное планирование и изготовление индивидуальных имплантатов. Акцентирование последнего пункта связано с особенностью применяемых ими биомodelей из полиуретановой пены — данный материал, безусловно, более мягкий, что позволяет проще выполнять симуляционную остеотомию и установку имплантатов, особенно по сравнению со стереолитографическими моделями. Можно согласиться в этом с авторами, так как, действительно, модели, выполненные методом стереолитографии, намного тверже и гораздо менее эластичны. Однако метод фрезеровки, или еще так называемый субтрактивный метод изготовления трехмерных моделей, обладает и недостатками по сравнению с аддитивными методами, прежде всего это невозможность изготовления целиком сложных моделей позвоночника с воспроизведением внутренней структуры позвоночного канала. Кроме того, использование высокоскоростной дрели делает возможным выполнение симуляционных остеотомий и формирование каналов для установки винтов и на стереолитографических моделях. Это подтверждают и наш опыт, и данные литературы. Так, Р. D'Urso и соавт. [27] впервые опубликовали данные об изготовлении стереолитографических моделей у 20 пациентов с различной патологией позвоночника с последующим просверливанием каналов для винтов [27]. Прозрачность стереолитографических моделей позволяла точно проследить траекторию винта. С развитием технологии 3D-печати стало возможным применять и другие виды пластиковых материалов с более подходящими свойствами. Авторы отметили, что в 2 случаях было невозможно безопасно установить винт на модели, в связи с чем план оперативного лечения и установки металлоконструкции был изменен. Аналогичные случаи мы наблюдали в нашей практике, когда по данным биомоделирования становилось очевидно, что установка фиксирующих имплантатов с выполнением коррекции деформации из запланированного доступа невозможна, что соответственно вносило коррективы в план операции [9].

Одной из крайне интересных возможностей использования аддитивных технологий видится возможность изготовления шаблонов-направителей для последующей установки винтов в позвонки. Р. D'Urso и соавт. [27] одними из первых описали вариант изготовления таких шаблонов. Авторы на первом этапе формировали сверлом канал в позвонке в месте предполагаемого винта, затем устанавливали в сформированный канал спицу-пин и делали шаблон из метакрилата, после соответственно удаления пина можно было использовать

шаблон в качестве направляющей для формирования каналов для винтов в позвонках пациента. Авторы, в частности, описывают опыт трансартикулярной установки винтов C_1 – C_{II} с использованием направителей. Развитие технологий компьютерного 3D-моделирования позволяет определять и симулировать оптимальную траекторию винта на виртуальной модели, с последующим изготовлением физической биомодели и направляющих шаблонов. Мы также использовали эти возможности при операциях на шейном отделе позвоночника и находим их удобными и полезными. J. Yang и соавт. [28] сообщают об успешном применении трехмерных моделей и направителей для установки винтов и проведения корригирующих операций у 20 пациентов с тяжелыми деформациями грудного отдела позвоночника. Авторы отмечают, что высокая точность биомodelей позволила добиться оптимальных результатов при выполнении операций, точность проведения винтов подтвердилась данными послеоперационных КТ-исследований, продолжительность операций существенно сократилась.

Выполнение симуляционной операции на трехмерной модели дает возможность заранее подготовить имплантаты необходимого размера, а также придать стержням необходимую длину и форму как для улучшения степени коррекции деформаций, так и для уменьшения продолжительности операции. K. Toyoda и соавт. [29] описали результат лечения пациента с атлантоаксиальной нестабильностью, для которого предварительно на модели были определены направление винтов и отмоделированы стержни, которые и использовались во время операции.

Одним из самых интересных и перспективных направлений развития аддитивных технологий в вертебрологии нам видится возможность изготовления индивидуальных имплантатов, позволяющих разрешить крайне тяжелые ситуации у пациентов с деформациями позвоночника, прежде всего на фоне врожденных аномалий, опухолей позвоночника и посттравматических дефектов. В опубликованном в 2017 г. систематическом обзоре литературы, посвященном методам 3D-печати в вертебрологии [30], выявлено 6 работ, посвященных изготовлению индивидуальных имплантатов методом 3D-печати, причем все статьи были опубликованы в 2016–2017 гг. Все имплантаты были изготовлены из титана. В трех работах индивидуальные имплантаты изготавливали для пациентов с краниовертебральной патологией. K. Phan и соавт. [31] индивидуально изготовленный фиксирующий имплантат устанавливали из заднего доступа пациенту с артропатией C_1 – C_{II} [31]. Две другие работы посвящены изготовлению передних стабилизирующих имплантатов методом 3D-печати: в одном случае у пациента с саркомой Юинга позвонка C_{II} имплантат был установлен из переднего ретрофарингеального доступа [32], в другом случае у пациента с хордой позвонка C_{II} — из трансорального доступа [33]. Во всех случаях получены хорошие отдаленные результаты со стабильной фиксацией. Мы в своей ра-

боте применяли для передней трансоральной стабилизации краниовертебральной зоны индивидуально изготовленные имплантаты на основании компьютерных и объемных моделей у 7 пациентов [34–37]. Наш опыт и данные зарубежных коллег подтверждают, что выполнение реконструктивных операций на краниовертебральном сегменте при грубых нарушениях анатомии вряд ли возможно без применения индивидуальных имплантатов. Опубликованы данные об изготовлении и успешном применении телозамещающего имплантата у подростка с опухолью позвонка Th_{IX} [38] и индивидуального кейджа при врожденной аномалии поясничного отдела позвоночника [33] с хорошими отдаленными результатами лечения. Наш опыт изготовления и применения индивидуальных кейджей и пластин при патологии пояснично-крестцового отдела также показал высокую эффективность аддитивных технологий.

Резекция части или целого крестца при опухолевых процессах является серьезным вызовом для хирургов — высокие нагрузки в данной анатомической области требуют проведения максимально стабильной реконструкции. Предлагались различные методы реконструктивных операций с применением большого количества фиксирующих элементов — винтов, стержней и т.п. и проведением костной пластики. Современные возможности аддитивных технологий открывают новые возможности в решении этой проблемы. В частности, описано применение изготовленных методом 3D-печати протезов части крестца, с помощью которых удалось полностью заместить образовавшиеся после удаления опухолей дефекты [39, 40]. Наш опыт применения разработанных и изготовленных собственных индивидуальных имплантатов для выполнения позвоночно-тазовой фиксации в целом положителен и позволяет предположить потенциальную возможность использования данной технологии при реконструктивных операциях после удаления опухолей крестца.

Кроме того, в литературе отмечается уникальная возможность с помощью 3D-печати воспроизводить внутренние структуры объектов, т.е. создавать имплантаты с заданной пористой структурой, сопоставимой с губчатой костной тканью, и, таким образом, улучшать фиксацию на уровне кость–имплантат [41]. Необходимо отметить, что выполненные таким образом имплантаты при необходимости могут носить как индивидуальный характер, так и серийный, что расширит их применение. Изготовленный нами первоначально как индивидуальный кейдж для выполнения передней стабилизации при спондилолистезе в настоящее время выпускается уже небольшими партиями. Целый ряд фирм-изготовителей производит кейджи по методу трехмерной печати.

В перспективе представляется возможным изготовление имплантатов не только из титана, но и из других материалов с целью достижения лучшей биосовместимости, лучшей остеоинтеграции, возможности биорезорбции и др.

Заключение. Полноразмерные объемные модели позвоночника позволяют более полно оценить

характер деформации, получить дополнительную пространственную информацию. С помощью трехмерных моделей появляется возможность проводить предоперационное планирование, симуляцию этапов операции, подбор и подготовку имплантатов; выполнять приспособления для установки в позвонки винтов для минимизации риска развития осложнений при грубых анатомических изменениях позвоночника и в его шейном отделе. Трехмерные модели можно применять в качестве обучающего материала и для проведения экспериментальных работ. Трехмерные объемные модели и компьютерное моделирование делают возможным выполнение индивидуальных металлоконструкций для фиксации позвоночника, что особенно актуально при тяжелых деформациях позвоночника, когда применение стандартных имплантатов для спондилосинтеза не представляется возможным.

Необходимы дальнейшая работа по изучению отечественного и зарубежного опыта применения аддитивных технологий, анализ отдаленных результатов и повышение доступности данных технологий.

ЛИТЕРАТУРА [REFERENCES]

1. Рогинский В.В., Евсеев А.В., Коцюба Е.В. Лазерная стереолитография — новый метод биомоделирования в черепно-лицевой хирургии. Детская стоматология. 2000;1-2/(3-4):92-95 [Roginskiy V.V., Evseev A.V., Kosyuba E.V. Laser stereolithography — new method of biomodeling in cranio-maxillo-fascial surgery. Detskaya stomatologiya. 2000;1-2/(3-4):92-95. (in Russ.)].
2. Иванов А.Л., Сатанин Л.А., Аганов П.И. и др. Компьютерное планирование и биомоделирование в лечении пациента со сложными посттравматическим дефектом и деформацией краниофациальной области (клиническое наблюдение). Нейрохирургия и неврология детского возраста. 2012;2(32-33):144-151 [Ivanov A.L., Satanin L.A., Agapov P.I. et al. Computer aided design and biomodeling in severe posttraumatic craniofacial deformity (clinical case). Pediatric Neurosurgery and Neurology Research Journal. 2012;2(32-33):144-151 (in Russ.)].
3. Потапов А.А., Корниенко В.Н., Кравчук А.Д. и др. Современные технологии в хирургическом лечении последствий травмы черепа и головного мозга. Вестник РАМН. 2012;9:31-38. [Potapov A.A., Kornienko V.N., Kravchuk A.D. et al. Modern technologies in the surgical treatment of head injury sequelae. Vestnik RAMN. 2012;9:31-38. (in Russ.)].
4. Brown G.A., Milner B., Firoozbakhsh K. Application of computer-generated stereolithography and interpositioning template in acetabular fractures: a report of eight cases. J Orthop Trauma. 2002;16(5):347-352.
5. Kawaguchi Y., Nakano M., Yasuda T. et al. Development of a new technique for pedicle screw and magerl screw insertion using a 3-dimensional image guide. Spine (Phila Pa 1976). 2012;37(23):1983-1988. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e31825ab547>.
6. Yang J.C., Ma X.Y., Lin J. et al. Personalised modified osteotomy using computer-aided design-rapid prototyping to correct thoracic deformities. Int Orthop. 2011;35(12):1827-1832. <https://doi.org/10.1007/s00264-010-1155-9>.
7. D'Urso P.S., Williamson O.D., Thompson R.G. Biomodeling as an aid to spinal instrumentation. Spine (Phila Pa 1976). 2005;30(24):2841-2845.
8. Доценко В.В., Загородний Н.В., Лака А.А. и др. Оперативное лечение спондилолистеза. Acta Biomedica Scientifica. 2006;4(50):77-81. [Dotsenko V.V., Zagorodniy N.V., Laka A.A. et al. Surgical treatment of spondylolisthesis. Acta Biomedica Scientifica. 2006;4(50):77-81. (in Russ.)].
9. Кулешов А.А., Ветрилэ М.С., Лисянский И.Н. и др. Хирургическое лечение пациента с врожденной деформацией позвоночника, аплазией корней дуг грудных и поясничных позвонков, компрессионным спинальным синдромом. Хирургия позвоночника. 2016;13(3):41-48. [Kuleshov A.A., Vetrile M.S., Lisyanskiy I.N. et al. Surgical treatment of a patient with congenital deformity of the spine, the thoracic and lumbar pedicle aplasia, and spinal compression syndrome. Hirurgia pozvonochnika. 2016;13(3):41-48. (in Russ.)]. <http://dx.doi.org/10.14531/ss.2016.3.41-48>.
10. Доценко В.В., Шевелев И.Н., Загородний Н.В. и др. Спондилолистез: передние малоинвазивные операции. Хирургия позвоночника. 2004;1:47-54. [Dotsenko V.V., Shevelev I.N., Zagorodniy N.V. et al. Spondylolisthesis: anterior mini-invasive surgery. Hirurgia pozvonochnika. 2004;1:47-54 (in Russ.)].
11. Пантелеев А.А., Сажнев М.Л., Горбатюк Д.С. и др. Трехколонная остеотомия позвоночника при ревизионном вмешательстве у пациентки с врожденным ангулярным груднопоясничным кифосколиозом. Хирургия позвоночника. 2018;15(3):30-38. [Panteleyev A.A., Sazhnev M.L., Gorbatiyuk D.S. et al. Three-column osteotomy of the spine during revision surgery in a patient with congenital angular thoracolumbar kyphoscoliosis. Hirurgia pozvonochnika. 2018;15(3):30-38. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.14531/ss2018.3.30-38>
12. Шкарубо А.Н., Кулешов А.А., Тетюхин Д.В. и др. Устройство для передней стабилизации C1-C2 позвонков. Патент РФ №2615900; 2016 [Shkarubo A.N., Kuleshov A.A., Tetyuhin D.V. et al. Device for anterior C1-C2 fixation. Patent RF №2615900; 2016. (in Russ.)].
13. Шкарубо А.Н., Кулешов А.А., Тетюхин Д.В. и др. Устройство для передней стабилизации C1-C3 позвонков Патент РФ №2615901; 2016 г. [Shkarubo A.N., Kuleshov A.A., Tetyuhin D.V. et al. Device for anterior C1-C2 fixation. Patent RF № 2615901; 2016. (in Russ.)].
14. Шкарубо А.Н., Кулешов А.А., Тетюхин Д.В. и др. Устройство для передней стабилизации C1-C4 позвонков Патент РФ №2652740; 2017. [Shkarubo A.N., Kuleshov A.A., Tetyuhin D.V. et al. Device for anterior C1-C4 fixation. Patent RF №2652740; 2017. (in Russ.)].
15. Шкарубо А.Н., Кулешов А.А., Тетюхин Д.В. и др. Устройство для передней стабилизации шейных позвонков атланто-субаксиального уровня. Патент РФ №2652741; 2016 г. [Shkarubo A.N., Kuleshov A.A., Tetyuhin D.V. et al. Device for anterior fixation of atlanto-subaxial cervical spine. Patent RF № 2652741; 2016. (in Russ.)].
16. Кулешов А.А., Ветрилэ М.С., Лисянский И.Н. и др. Устройство для фиксации, по меньшей мере, части грудного и/или поясничного отделов позвоночника человека к тазу. Патент РФ №2585733; 2014. [Kuleshov A.A., Vetrile M.S., Lisyanskiy I.N. et al. Device for fixation at least part of thoracic and/or lumbar spine to pelvis. Patent RF №2585733; 2014 (in Russ.)].
17. Кулешов А.А., Ветрилэ М.С., Лисянский И.Н. и др. Способ инструментальной фиксации, по меньшей мере, части грудного и/или поясничного отдела позвоночника к тазу при различных заболеваниях позвоночника. Патент РФ №2584810; 2014. [Kuleshov A.A., Vetrile M.S., Lisyanskiy I.N. et al. Method of fixation at least part of thoracic and/or lumbar spine to pelvis. Patent RF № 2584810; 2014. (in Russ.)].
18. Кулешов А.А., Шкарубо А.Н., Громов И.С. и др. Хирургическое лечение неопухолевых заболеваний краниовертебральной области. Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2018;1:36-41. [Kuleshov A.A., Shkarubo A.N., Gromov I.S. et al. Surgical treatment for nontumorous diseases of craniovertebral region. N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics. 2018;1:36-41. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.32414/0869-8678-2018-1-36-41>.
19. Tonner H.D., Engelbrecht H. A new method for the preparation of special alloplastic implants for partial replacement of the pelvis. Fortschr Med. 1979;97(16):781-783. (in German).
20. Mankovich N.J., Cheeseman A.M., Stoker N.G. The display of three-dimensional anatomy with stereolithographic models. J Digit Imaging. 1990;3(3):200-203.
21. Abbott J., Netherway D., Wingate P. et al. Craniofacial imaging, models and prostheses. Austr J Otolaryngol. 1994;1(6):581-587.

22. D'Urso P.S., Atkinson R.L., Lanigan M.W. et al. Stereolithographic (SL) biomodelling in craniofacial surgery. *Br J Plast Surg.* 1998;51:522-530.
23. Антонов А.Н., Евсеев А.В., Камаев С.В. и др. Лазерная стереолитография — технология послойного изготовления трехмерных объектов из жидких фотополимеризующихся композиций. *Оптическая техника.* 1998;1(13):5-14. [Antonov A.N., Evseev A.V., Kamaev S.V. et al. Laser stereolithography - technology of laminated manufacturing of 3D objects from liquid photopolymeric compounds. *Opticheskaya tekhnika.* 1998;1(13):5-14. (in Russ.)].
24. Kravtchouk A., Potapov A., Kornienko V. et al. Computed modelling in reconstructive surgery for posttraumatic skull vault bone defects. In: Potapov A., Likhterman L., von Wild K.R.H., eds. *Neurotrauma.* Moscow: «Antidor» Publishing House; 2002:187-190.
25. D'Urso P.S., Askin G., Earwaker W.J.S. et al. Spinal biomodelling. *Spine (Phila Pa 1976).* 1999;24: 247-1251.
26. van Dijk M., Smit T.H., Jiya T.U., Wuisman P.I. Polyurethane real-size models used in planning complex spinal surgery. *Spine (Phila Pa 1976).* 2001;26 (17):1920-6192.
27. D'Urso P.S., Williamson O.D., Thompson R.G. Biomodeling as an aid to spinal instrumentation. *Spine (Phila Pa 1976).* 2005;30(24):2841-2845.
28. Yang J.C., Xiang Yang Ma X.Y., Lin J. et al. Personalised modified osteotomy using computer-aided design-rapid prototyping to correct thoracic deformities. *Int Orthop.* 2011;35(12):1827-1832. <https://doi.org/10.1007/s00264-010-1155-9>.
29. Toyoda K., Urasaki E., Yamakawa Y. Novel approach for the efficient use of a full-scale, 3-Dimensional model for cervical posterior fixation. *Spine (Phila Pa 1976).* 2013;38(21):E1357-1360. <https://doi.org/10.101097/BRS.0b013e3182a1f1bd>.
30. Wilcox B., Mobbs R.J., Wu A.-M., Phan K. Systematic review of 3D printing in spinal surgery: the current state of play. *J Spine Surg.* 2017;3(3):433-443. <https://doi.org/10.101037/jss.2017.09.01>.
31. Phan K., Sgro A., Maharaj M.M. et al. Application of a 3D custom printed patient specific spinal implant for C1/2 arthrodesis. *J Spine Surg.* 2016;2(4):314-318. <https://doi.org/10.101037/jss.2016.12.06>.
32. Xu N., Wei F., Liu X. et al. Reconstruction of the upper cervical spine using a personalized 3D-printed vertebral body in an adolescent with ewing sarcoma. *Spine (Phila Pa 1976).* 2016;41(1):E50-54. <https://doi.org/10.101097/BRS.0000000000001179>.
33. Mobbs R.J., Coughlan M., Thompson R. et al. The utility of 3D printing for surgical planning and patient-specific implant design for complex spinal pathologies: case report. *J Neurosurg Spine.* 2017;26(4):513-518. <https://doi.org/10.1010317/2016.9.SPINE16371>.
34. Shkarubo A.N., Kuleshov A.A., Chernov I.V., Vetrile M.S. Transoral decompression and anterior stabilization of atlantoaxial joint in patients with basilar impression and Chiari malformation type i: a technical report (2 clinical cases). *World Neurosurg.* 2017;102:181-190. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.02.113>.
35. Shkarubo A.N., Kuleshov A.A., Chernov I.V. et al. Transoral decompression and stabilization of the upper cervical segments of the spine using custom-made implants in various pathologic conditions of the craniovertebral junction. *World Neurosurg.* 2018;109:e155-e163. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.09.124>.
36. Шкарубо А.Н., Кулешов А.А., Чернов И.В. и др. Хирургическое лечение инвагинированного зубовидного отростка C2-позвонка, сочетающегося с аномалией Киари I типа. *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова.* 2017;1:66-72. [Shkarubo A.N., Kuleshov A.A., Chernov I.V. et al. Surgical treatment of C2 odontoid process intussusception in combination with type I Chiari malformation. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics.* 2017;1:66-72. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.32414/0869-8678-2017-1-66-72>.
37. Шкарубо А.Н., Кулешов А.А., Чернов И.В. и др. Передняя стабилизация C_I-C_{III} позвонков после трансорального удаления агрессивной аневризматической кисты C_{II} позвонка (клиническое наблюдение и обзор литературы). *Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко.* 2018;82(5):111-118. [Shkarubo A.N., Kuleshov A.A., Chernov I.V. et al. Anterior stabilization of the C_I-C_{III} vertebrae after transoral removal of an aggressive aneurysmal bone cyst of the C_{II} vertebra (a case report and literature review). *Voprosy neurokhirurgii im. N.N. Burdenko.* 2018;82(5):111-118. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.101017116/neiro201882051111>.
38. Choy W.J., Mobbs R.J., Wilcox B. et al. Reconstruction of thoracic spine using a personalized 3D-printed vertebral body in adolescent with T9 primary bone tumor. *World Neurosurg.* 2017;105:1032.e13-1032.e17. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.05.133>.
39. Wei R., Guo W., Ji T. et al. One-step reconstruction with a 3D-printed, custom-made prosthesis after total en bloc sacrectomy: a technical note. *Eur Spine J.* 2017;26(7):1902-1909. <https://doi.org/10.101007/s00586-016-4871-z>.
40. Kim D., Lim J.Y., Shim K.W. et al. Sacral reconstruction with a 3D-Printed implant after hemisacrectomy in a patient with sacral osteosarcoma: 1-year follow-up result. *Yonsei Med J.* 2017;58(2):453-457. <https://doi.org/10.10103349/ymj.2017.58.2.453>.
41. Tritanium Posterior Lumbar Cage Technical Summary. 2016. Available online: [http://www.stryker.com/built-tofuse/media/assets/TRITA-BR-3 Tritanium Technical Summary FINAL.pdf](http://www.stryker.com/built-tofuse/media/assets/TRITA-BR-3%20Tritanium%20Technical%20Summary%20FINAL.pdf).

Сведения об авторах: Кулешов Александр Алексеевич — доктор мед. наук, рук. группы вертебологии НМИЦ ТО им. Н.Н. Приорова; Ветрилэ Марсел Степанович* — канд. мед. наук, старший науч. сотр. группы вертебологии НМИЦ ТО им. Н.Н. Приорова, <https://orcid.org/0000-0001-6689-5220>, e-mail: cito-spine@mail.ru; Шкарубо Алексей Николаевич — доктор мед. наук, ведущий науч. сотр. НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н.Н. Бурденко, <https://orcid.org/0000-0003-3445-3115>; Доценко Владимир Валентинович — доктор мед. наук, врач-нейрохирург НМИЦ ТО им. Н.Н. Приорова; Еськин Николай Александрович — доктор мед. наук, зам. директора НМИЦ ТО им. Н.Н. Приорова; Лисянский Игорь Николаевич — канд. мед. наук, врач группы вертебологии НМИЦ ТО им. Н.Н. Приорова; Макаров Сергей Николаевич — канд. мед. наук, врач группы вертебологии НМИЦ ТО им. Н.Н. Приорова.

Для контактов: Кулешов А.А. — e-mail: cito-spine@mail.ru

Information about the authors: Kuleshov A.A. — Dr. Sci. (Med.), head of vertebrology group, N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopaedics; Vetrile M.S. — Cand. Sci. (Med.), senior researcher, vertebrology group, N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopaedics, <https://orcid.org/0000-0001-6689-5220>, e-mail: cito-spine@mail.ru; Shkarubo A.N. — Dr. Sci. (Med.), leading researcher, N.N. Burdenko National Scientific and Practical Center for Neurosurgery, <https://orcid.org/0000-0003-3445-3115>; Docenko V.V. — Dr. Sci. (Med.), neurosurgeon, N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopaedics; Es'kin N.A. — Dr. Sci. (Med.), deputy director, N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopaedics; Lisyanskiy I.N. — Cand. Sci. (Med.), physician, vertebrology group, N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopaedics; Makarov S.N. — Cand. Sci. (Med.), physician, vertebrology group, N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopaedics.

Contact: Kuleshov A.A. — e-mail: cito-spine@mail.ru