



ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ИМПЛАНТАТЫ В ХИРУРГИИ ПОЗВОНОЧНИКА: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

**А.В. Косулин, Д.В. Елякин, В.Г. Мифоненко, А.В. Подрезова, А.Я. Слободина, У.И. Губина,
К.О. Борисова, М.В. Зырянова, А.М. Шорохов**

Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

Цель исследования. Обобщение отраженного в литературе опыта применения индивидуальных имплантатов в хирургии позвоночника с анализом поставленных перед оперативным вмешательством задач и вариантов технического решения, а также нозологии, возраста пациентов, распределения случаев и публикаций по странам.

Материал и методы. Выполнен систематический поиск публикаций в электронных базах данных PubMed/Medline, Google Scholar, eLibrary, а также в библиографических списках отобранных для анализа статей. В обзор включены публикации на английском и русском языках, описывающие клиническое применение индивидуальных имплантатов при хирургическом лечении заболеваний позвоночника.

Результаты. В итоговый анализ включили 41 источник, обработали данные о 340 случаях. В публикациях предложены технические решения для выполнения реконструкции C₁–C₂, стабилизации C₁–C₂, дистракции на вогнутой стороне деформации в субаксиальном шейном отделе, передней реконструкции позвонков субаксиального шейного, грудного и поясничного отделов, коррекции сагиттального либо фронтального баланса, достижения «нулевого» профиля имплантата, передней и задней стабилизации в неблагоприятных анатомических условиях. Использовались имплантаты следующих типов: передние верхнешейные с посадочными площадками для C₀ или C₁, имплантаты-шаблоны для трансартрикулярного артродеза C₁–C₂, односторонние дистракционные спейсеры, конгруэнтные межтеловые имплантаты, конгруэнтные телозамещающие имплантаты, индивидуальные передние пластины, мостовидные передние имплантаты, «моноклитные» имплантаты, воспроизводящие элементы стандартных изделий без соединительных узлов.

Заключение. Индивидуальные имплантаты использовались при несоответствии имеющихся серийных изделий поставленным задачам либо анатомическим особенностям пациента. Нозология в большинстве случаев представлена дегенеративными и онкологическими заболеваниями у лиц старшей возрастной группы.

Ключевые слова: индивидуальные имплантаты; 3D-печать; систематический обзор.

Для цитирования: Косулин А.В., Елякин Д.В., Мифоненко В.Г., Подрезова А.В., Слободина А.Я., Губина У.И., Борисова К.О., Зырянова М.В., Шорохов А.М. Индивидуальные имплантаты в хирургии позвоночника: систематический обзор литературы // Хирургия позвоночника. 2026. Т. 23, № 1. С. 82–91. DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2026.1.82-91>

PATIENT-SPECIFIC IMPLANTS IN SPINE SURGERY: SYSTEMATIC REVIEW

A.V. Kosulin, D.V. Elyakin, V.G. Mironenko, A.V. Podrezova, A.Ya. Slobodina, U.I. Gubina,

K.O. Borisova, M.V. Zyryanova, A.M. Shorokhov

Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russia

Objective. To review the current clinical use of patient-specific implants in spinal surgery concerning a problem solved, a disease treated, patients age, distribution of cases and publications by countries.

Material and Methods. A systematic search in PubMed/Medline, Google Scholar, and eLibrary databases was conducted. Reference lists of included articles were screened for additional publications. All articles in English and Russian with available full text describing clinical use of patient-specific implants in spinal surgery were included.

Results. 41 articles were included in final review with a total of 340 patients. Problems solved with individual implants were as follows: 1) C₁–C₂ reconstruction; 2) C₁–C₂ stabilization; 3) concave side distraction in subaxial cervical spine; 4) anterior reconstruction of subaxial cervical, thoracic, and lumbar spine; 5) sagittal or frontal balance correction; 6) zero-profile of the implant; 7) anterior and 8) posterior stabilization under unfavorable conditions. Types of implants used were as follows: 1) reconstructive implants for upper cervical spine bearing docking sites for C₀ or C₁; 2) implant-template for transarticular C₁–C₂ arthrodesis; 3) spacers for concave side distraction; 4) congruent interbody implants; 5) congruent body-substitute implants; 6) personified anterior plates; 7) bridge-type anterior implants; 8) “monolith” implants which reproduce serial devices without connecting nodes.

Conclusion. Personified implants were used when serial devices did not match the task at hand or anatomical features of individual patient. Pathologies treated were primarily degenerative disease and tumors in elderly persons.

Key Words: patient-specific implants; 3D-printing; systematic review.

Please cite this paper as: Kosulin AV, Elyakin DV, Mironenko VG, Podrezova AV, Slobodina AY, Gubina UI, Borisova KO, Zyryanova MV, Shorokhov AM. Patient-specific implants in spine surgery: systematic review. Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika). 2026;23(1):82–91. In Russian. DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2026.1.82-91>

Аддитивные технологии, позволяющие физически воспроизводить виртуальные трехмерные объекты, нашли применение в ряде областей хирургии, в том числе при оперативном лечении заболеваний позвоночника [1, 2]. Если преимущества и недостатки неимплантируемых объектов (референтных моделей зоны интереса и навигационных шаблонов) хорошо изучены [3–5], то данных о применении персонифицированных имплантатов существенно меньше. Учитывая, что изготовление индивидуальных имплантируемых объектов требует значительных временных и финансовых затрат [6–8], а также должно соответствовать строгим стандартам качества [9], в «типовой» клинической ситуации, когда цель операции может быть достигнута с использованием серийных изделий, применение индивидуальных имплантатов представляется нерациональным. Вместе с тем, если применение серийных изделий сопряжено с высоким риском интра- или послеоперационных осложнений, требует дополнительных травматичных оперативных приемов либо в принципе не позволяет решить стоящую перед оператором задачу, использование уникального имплантата, отвечающего анатомическим особенностям пациента и специфике заболевания, может оказаться наилучшим подходом.

Цель исследования – обобщение отраженного в литературе опыта применения индивидуальных имплантатов в хирургии позвоночника с анализом поставленных перед оперативным вмешательством задач и вариантов технического решения, а также нозологии, возраста пациентов, рас-

пределения случаев и публикаций по странам.

Материал и методы

Стратегия поиска

Выполнен систематический поиск публикаций в электронных базах данных PubMed/Medline, Google Scholar, eLibrary с использованием комбинаций следующих ключевых слов: 3-Dimensional-Printed, Custom-Made, Customized, Individualized, Patient-Specific, Personalized, Spine, Spinal, Vertebral, индивидуальный, персонифицированный, 3D, имплантат, позвонок, позвоночник, а также логических операторов AND и OR, по состоянию на 28.06.2025 г. Решение о соответствии публикаций критериям включения принималось на основании консенсуса двух первых авторов. Для выявления соответствующих критериям включения публикаций, не обнаруженных при первичном поиске, проведено изучение библиографических списков отобранных для анализа статей.

Критерии включения и исключения

В обзор включены публикации на английском и русском языках, описывающие клиническое применение индивидуальных имплантатов при хирургическом лечении заболеваний позвоночника. Исключали обзоры литературы, лабораторные биомеханические исследования, исследования на животных, сообщения об использовании серийных имплантатов, изготовленных методом 3D-печати, публикации о применении индивидуальных предызогнутых стержней, статьи с недоступным полным текстом.

Извлечение и синтез данных

При извлечении данных учитывали фамилию первого автора, год публикации, государственную принадлежность учреждений, количество и возраст пациентов, патологию, сравнительный либо описательный характер исследования, используемый материал, решаемую с помощью персонифицированного имплантата задачу, конструкцию индивидуального изделия. Если в исследовании участвовали авторы из разных стран, публикацию и описанные в ней случаи учитывали для каждой страны. При повторном упоминании авторами ранее опубликованных ими наблюдений количество пациентов соответственно корректировали.

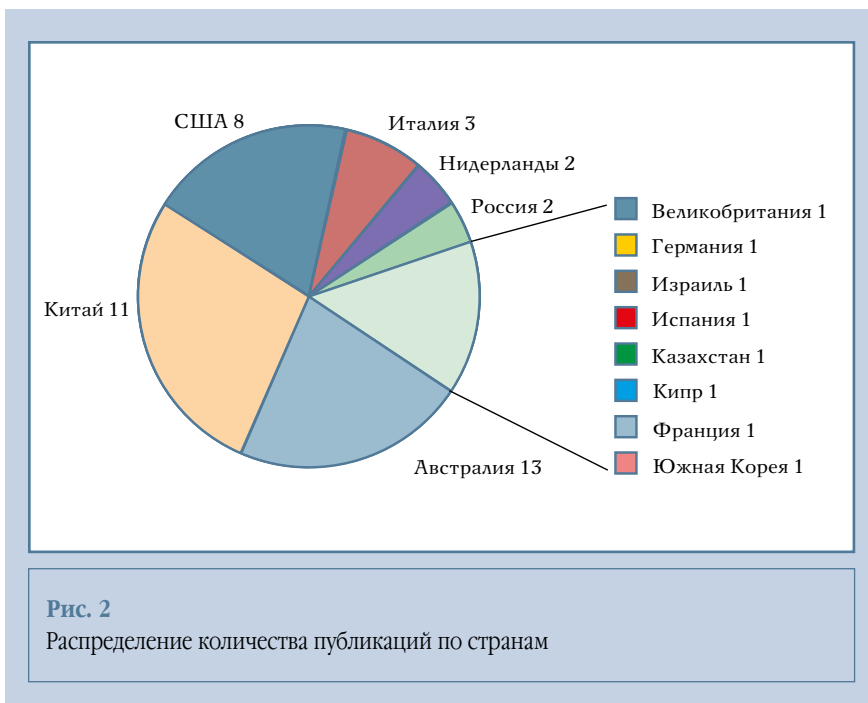
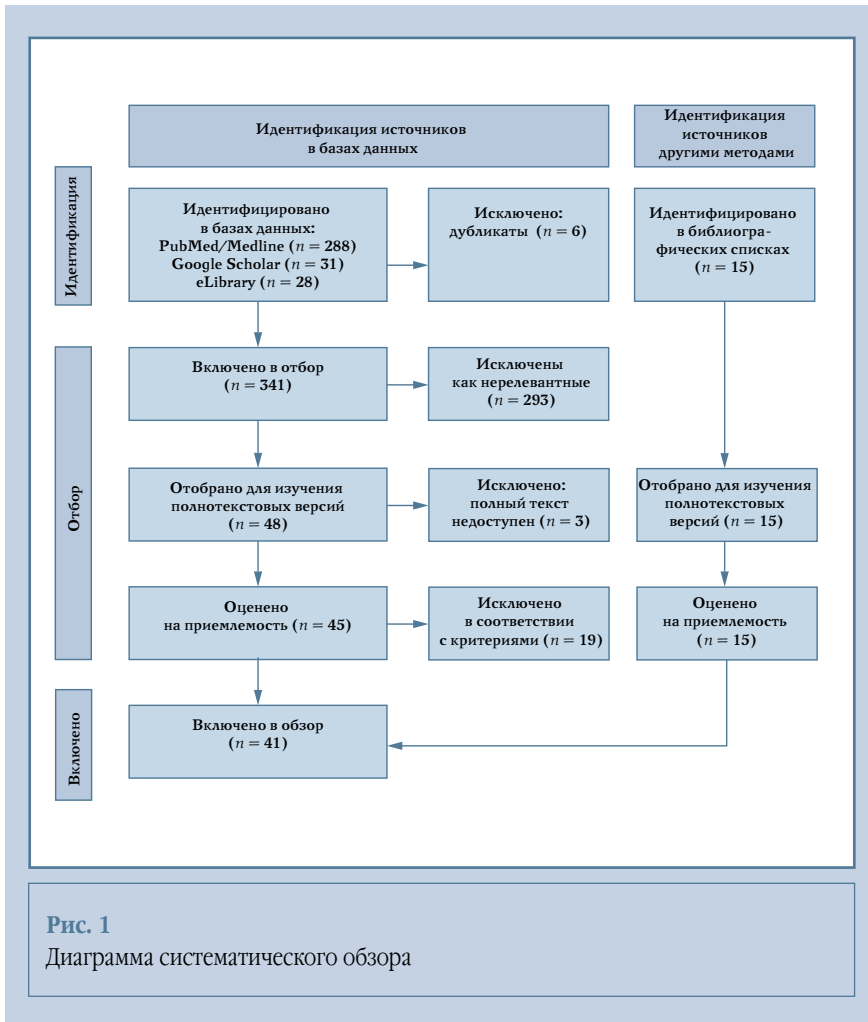
Результаты

При поиске выявлено 347 публикаций, 6 дубликатов удалено, 312 статей удалены как нерелевантные или несоответствующие критериям включения. При изучении библиографических списков дополнительно идентифицировали 15 источников, 3 публикации удалены в связи с недоступным полным текстом. В итоговый анализ включили 41 источник (рис. 1; приложение*).

Распределение количества публикаций и пациентов по странам

В шести публикациях отражены результаты международного сотрудничества (данные работы и описанные в них наблюдения учтены дважды). Наибольшее количество статей подготовлено авторами из Австралии, Китая и США. Опыт большинства государств (8 из 14) изложен в единичных сообщениях (рис. 2).

* Приложение доступно в электронном варианте по ссылке: <https://www.spinesurgery.ru/jour/issue/current>



Исследователи из США и Китая располагают наиболее значительным количеством наблюдений. Среди остальных авторов только австралийские, итальянские и российские приводят данные о десяти или более пациентах (рис. 3).

Сравнительные и описательные исследования

Только одно исследование носило сравнительный характер [10]. Две работы в качестве группы сравнения приводят ранее опубликованные данные [11, 12]. Подавляющее большинство статей приводят только описательные данные.

Возраст пациентов и патология

Из 340 наблюдений, описанных во включенных в обзор публикациях, наиболее многочисленную группу составили пациенты старшего возраста с дегенеративными заболеваниями – 147 случаев [6, 11, 13–17] (возраст одного из пациентов не указан в тексте статьи [16]). Значительные группы представлены опухолевыми поражениями позвоночника – 88 наблюдений (79 пациентов старше 18 лет, 9 – младше) [8, 10, 18–36] и тяжелыми деформациями у пожилых лиц – 65 пациентов [12]. В 28 случаях вмешательство было выполнено по поводу порока развития, в том числе у пяти взрослых [28, 30, 37–40]. У шести пациентов, в том числе у одного ребенка, показанием к операции послужили осложнения со стороны ранее установленных имплантатов [7, 24, 41–44]. Оставшиеся случаи представлены травматическими повреждениями (2) [30, 45], нейрофиброматозом (2, в том числе 1 ребенок) [9, 46], ревматоидным артритом (1) [25], болезнью Горхема (1) [9].

Используемый материал

В подавляющем большинстве исследований в качестве материала для изготовления имплантатов применялся титаноалюминиевый сплав. Два коллектива устанавливали изделия из полиэфирэфиркетона (ПЕЕК) [6, 35].

Поставленные задачи и технические решения

Во включенных в обзор публикациях предложены технические реше-

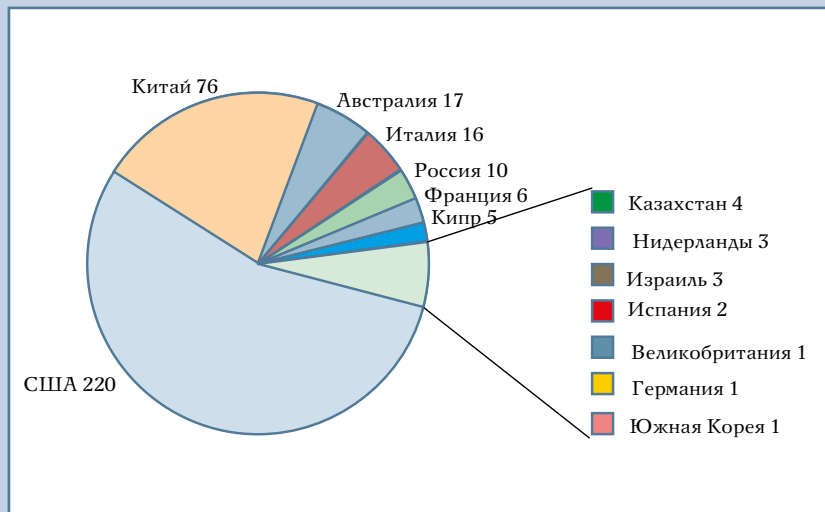


Рис. 3

Распределение количества пациентов по странам

ния для следующих вмешательств: 1) реконструкции C_1 – C_2 [8, 10, 18, 21–25, 27, 28, 32, 33]; 2) стабилизации C_1 – C_2 [14, 17, 30]; 3) дистракции на вогнутой стороне деформации в субаксиальном шейном отделе [39]; 4) передней реконструкции позвонков субаксиального шейного, грудного и поясничного отделов [6, 7, 19, 20, 24, 26, 29, 31, 34–36, 44, 45]; 5) коррекции сагиттального либо фронтального баланса [11–13, 15, 28, 37, 40]; 6) достижения «нулевого» профиля имплантата [41, 42]; 7) передней [9, 38, 46] и задней стабилизации в неблагоприятных анатомических условиях [43].

Принимая во внимание отсутствие общепринятой классификации индивидуальных имплантатов, авторы сочли возможным разделить все многообразие предложенных в публикациях технических решений на восемь типов: 1) передние верхнешейные имплантаты с посадочными площадками для C_0 или C_1 [8, 10, 18, 21–25, 27, 28, 32, 33]; 2) имплантаты-шаблоны для трансарткулярного артродеза C_1 – C_2 [14, 17]; 3) односторонние дистракционные спейсеры [39]; 4) конгруэнтные межтеловые имплантаты [11–13, 15, 16, 28, 37, 40]; 5) конгруэнтные телозамещающие имплантаты [6, 7,

10, 19, 20, 26, 29, 31, 34–36, 41, 44, 45]; 6) индивидуальные передние пластины [30, 38]; 7) мостовидные передние имплантаты [9, 46]; 8) «монолитные» имплантаты, воспроизводящие элементы стандартных изделий без соединительных узлов [42, 43].

Необходимо отметить, что между задачами и техническими решениями нет однозначного соответствия. Разные коллективы исследователей использовали для решения сходных задач различные типы имплантатов.

Обсуждение

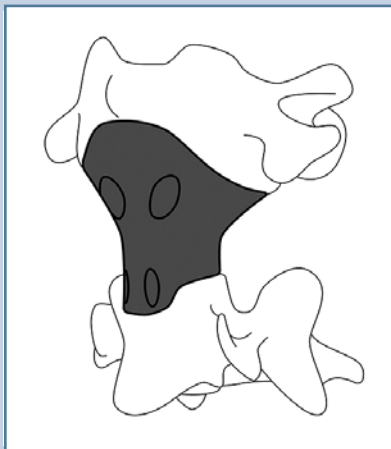
Анализ распределения публикаций и наблюдений по странам был проведен для получения данных о том, какое место занимает в настоящее время использование индивидуальных имплантатов в хирургии позвоночника и где технология применяется наиболее активно. Несмотря на значительное число наблюдений у американских и китайских авторов, в масштабах населения данных стран и количества ежегодно выполняемых вертебрологических операций (в США – более миллиона [47]), доля вмешательств с применением персонализированных изделий остается

ничтожно малой. Тем не менее опыт использования конгруэнтных межтеловых имплантатов, суммированный в двух многоцентровых исследованиях американских авторов [11, 12], охватывает 200 наблюдений и не имеет себе равных. Достижением китайских исследователей являются 38 случаев использования реконструктивных имплантатов для верхнешейного отдела [8, 10, 22–24, 27, 32, 33], а также разработка и применение у 22 пациентов индивидуальных межтеловых спейсеров для дистракции вогнутой стороны деформации при шейных полупозвонках [39]. Публикации австралийских авторов [13–15, 17, 19, 25, 28, 29, 37, 41, 43–45], наиболее многочисленные при небольшом количестве пациентов, обращают на себя внимание разнообразием используемых решений (пять типов индивидуальных имплантатов). Сообщения из других стран, описывающие небольшие серии или даже единичные случаи, позволяют надеяться на более широкое распространение технологии в будущем.

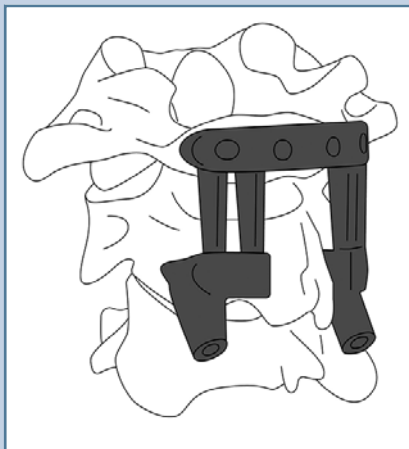
Передние верхнешейные имплантаты

Данные изделия предназначены для реконструкции передних структур после частичного либо полного удаления C_2 и/или C_1 и представляют собой призматическую конструкцию, опирающуюся на тело нижележащего позвонка и несущую посадочную поверхность для соединения с передней дугой атланта (рис. 4) или основанием черепа.

Минимальным вариантом использования подобного изделия является одностороннее протезирование боковой массы атланта [8]. Описано два способа фиксации имплантата к первому шейному позвонку: седловидная выемка, совмещаемая с нижней поверхностью передней дуги [18, 21], и Т-образное расширение, которое крепится к передней поверхности боковых масс винтами [8, 10, 22–25, 32]. После удаления C_1 винты устанавливали в скат [28] либо в мыщелки затылочной кости [23]. Основание имплантата, как правило, опирается на верхнюю поверхность

**Рис. 4**

Передний верхнешейный имплантат с опорной поверхностью для C₁. Авторский рисунок

**Рис. 5**

Имплантат-шаблон для трансартикулярного артродеза C₁–C₂. Авторский рисунок

тела C₃, к которому фиксируется двумя винтами. При распространении процесса на субаксиальный отдел применялись конструкции, опирающиеся на тела C₄, C₅ и Th₁ позвонков [22, 23, 27]. Чаще всего имплантаты устанавливали в сочетании с задней конструкцией, причем одни коллективы осуществляли дорсальную фиксацию первым этапом [10, 18, 22, 23, 28, 32], другие – вторым [8, 21, 25, 27], однако Girolami et al. [21] достигли удовлетворительного механического результата, применив только переднюю стабилизацию. Три группы авторов при резекции и реконструкции осевого позвонка нашли возможным отказаться от окципитоспондилодеза [10, 25, 32]. Примечательно, что из 45 операций (в том числе 7 с реконструкцией атланта) почти все были осуществлены из переднебокового субмандибулярного разреза, трансартериальный доступ потребовался только в двух случаях [10, 28]. Исследование Hu et al. [10] показало тенденцию к более высокой частоте дестабилизации имплантатов при использовании стандартной титановой сетки в сравнении с применением персонифицированного устройства (4/13 против 1/18, пограничная статистическая значимость).

По мнению ряда исследователей [21, 25, 27, 32], оптимального серийного изделия для реконструкции передних отделов C₁–C₂ не существует, что делает применение индивидуальных имплантатов для этой цели особенно востребованным.

Имплантат-шаблон для трансартикулярного артродеза C₁–C₂

Оригинальная конструкция индивидуального имплантата представлена группой австралийских авторов [14, 17]. Изделие имеет вид рамки, фиксируемой винтами к задней дуге атланта, опирающейся на задние структуры и несущей цилиндрические направлятели для трансартикулярных винтов, то есть является имплантируемым навигационным шаблоном (рис. 5).

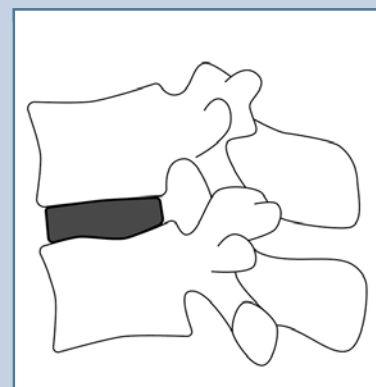
Для предварительного формирования трансартикулярных каналов авторы использовали отдельное направляющее устройство из пластмассы, также изготовленное методом 3D-печати. В сообщениях об использовании данной конструкции у трех пациентов нет указаний на какие-либо преимущества, кроме эргономических, в связи с чем ценность описанной технологии в сравнении с применением

неимплантируемых шаблонов представляется сомнительной.

Конгруэнтные межтеловые имплантаты

Индивидуализация межтеловых кейджей открывает пути для преодоления двух проблем, свойственных серийным изделиям. Во-первых, придание контактным поверхностям изделия формы, конгруэнтной замыкательным пластинкам выше- и нижележащего позвонков, увеличивает площадь соприкосновения и способствует равномерному распределению нагрузки, что уменьшает вероятность «проседания» имплантата в послеоперационном периоде [13, 29, 37]. Во-вторых, персонифицированный кейдж обладает заданным углом между контактными поверхностями, что делает его эффективным средством коррекции сагиттального и фронтального баланса (рис. 6).

Smith et al. [12] показали, что у 65 пациентов средняя разница между запланированным и полученным углом сегментарной коррекции составила 1°, причем нарушение сагиттального баланса после операции встречалось достоверно реже по сравнению с группой пациентов, у которых применялись серийные имплантаты. Не менее интересны данные Ashgar et al. [11], которые продемонстрировали значительно более высокую частоту восста-

**Рис. 6**

Конгруэнтный межтеловой имплантат. Авторский рисунок

новления нарушенных показателей сагиттального баланса при использовании индивидуальных кейджей. Три коллектива авторов использовали персонифицированные межтеловые имплантаты для одномоментной коррекции сагиттального и фронтального баланса у пожилых пациентов при дегенеративных заболеваниях на фоне не оперированных ранее поясничных полупозвонков [28, 37, 40]. Исследования, которые сравнивали бы частоту проседания серийных и персонифицированных межтеловых имплантатов, обнаружены не были, однако сообщения о единичных наблюдениях подтверждают полное сохранение коррекции в отсроченном периоде [13, 15, 28, 37, 40]. Имеются данные как об изолированном применении индивидуальных кейджей [13, 16, 37], так и об установке в сочетании с транспедикулярной конструкцией [12, 28, 40]. Возможна фиксация имплантатов к телам выше- и нижележащих позвонков винтами [13, 37] либо передними пластинами [15, 28, 40]. Практически во всех случаях кейджи устанавливали в поясничном отделе, имеется только одно сообщение о применении индивидуального межтелового имплантата на уровне C_6-C_7 [16]. Отраженный в литературе опыт использования конгруэнтных межтеловых имплантатов является наибольшим (228 наблюдений из 340), причем для данного типа продемонстрированы преимущества перед серийными изделиями.

Односторонние дистракционные спейсеры

Данные имплантаты очень близки к конгруэнтным межтеловым кейджам, однако в связи со специфической областью применения представляется уместным рассматривать их как отдельный тип. Li et al. [39] представили оригинальную методику хирургического лечения врожденного сколиоза на фоне шейных полупозвонков с использованием индивидуальных имплантатов. Подход предполагает отказ от связанной с риском повреждения позвоночной артерии резекции полупозвонка и выполнение дис-

тракции на соответствующем уровне вогнутой стороны с установкой персонифицированных спейсеров между суставными фасетками и телами выше- и нижележащего позвонков (рис. 7).

Для дополнительной фиксации использовали транспедикулярную конструкцию и переднюю пластину. Серия охватывает 22 наблюдения, авторы указывают на такие преимущества перед резекцией полупозвонка, как меньшие кровопотеря и продолжительность вмешательства. Примечательно, что именно применение индивидуальных имплантатов сделало эффективное дистракционное лечение врожденного шейного сколиоза возможным.

Конгруэнтные телозамещающие имплантаты

Этот тип изделий предназначен для реконструкции тел позвонков на одном или нескольких смежных уровнях (рис. 8).

Подобная необходимость возникла при радикальных онкологических операциях [19, 20, 24, 26, 29, 31, 34–36], а также при хирургическом лечении шейной спондилогенной миелопатии [6] и ревизиях по поводу дестабилизации ранее установленных серийных изделий [7, 41, 44]. В одном случае индивидуальный телозамещающий имплантат был использован при переломе C_7 с компрессией спин-

ного мозга [45]. К преимуществам персонифицированного изделия, помимо конгруэнтных контактных поверхностей, относится возможность коммутации с задней конструкцией. С этой целью имплантаты снабжались скобами для проволоочной фиксации [24, 31], отверстиями для установки серийных транспедикулярных винтов [7, 19, 35], шарнирными элементами с зажимами для соединения со стрессными дорсальной системы [20]. Ряд коллективов применял изделия с каналами для винтовой фиксации к телам выше- и нижележащего позвонков [26, 29, 34, 41, 44, 45]. Chung et al. [7] использовали имплантат из двух (правого и левого) компонентов, чтобы облегчить его установку из заднего доступа, однако точного совмещения деталей изделия исследователям добиться не удалось. Индивидуальные телозамещающие имплантаты наиболее часто применяли в грудном отделе [19, 20, 24, 31, 35, 36], а также в субаксиальном шейном [6, 24, 26, 29, 31, 34, 41, 44, 45] и поясничном [7, 20, 26, 35] отделах. Наиболее протяженный дефект передних структур – 6 уровней (C_3-Th_1) – удалось реконструировать Yang et al. [34]. На 53 описанных случаях использования персонифицированных телозамещающих изделий имеется только одно

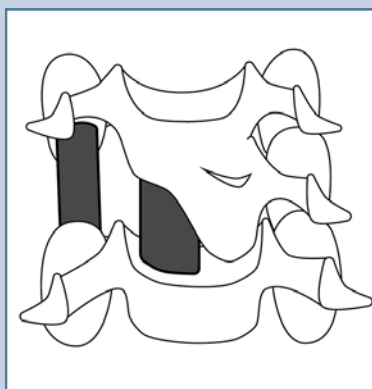


Рис. 7

Односторонние дистракционные спейсеры. Авторский рисунок

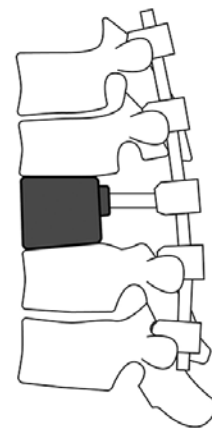


Рис. 8

Конгруэнтный телозамещающий имплантат. Авторский рисунок

сообщение о «проседании» имплантата, потребовавшем ревизионной операции [20]. Несмотря на отсутствие сравнительных исследований, преимущества реконструкции передних структур индивидуальными имплантатами, обеспеченных конгруэнтными опорными площадками и возможностью коммутации с задней конструкцией, не вызывают сомнений.

Индивидуальные передние пластины

Данные имплантаты использовались для стабилизации шейного отдела. Shkarubo et al. [30] у четырех пациентов при трансоральной одонтоидэктомии одномоментно выполняли фиксацию персонифицированной пластиной, которая крепилась винтами к телу C_2 и латеральным массам C_1 , без установки задней системы. При более обширной резекции, включавшей тело C_2 , тот же коллектив использовал аналогичное изделие с дополнительным опорным элементом, располагавшимся между суставными поверхностями атланта и телом C_3 , в сочетании с дорсальной конструкцией. Jackson et al. [38] применили индивидуальную пластину для стабилизации *in situ* при декомпрессии по поводу шейной дискогенной миелопатии на фоне обусловленного синдромом Клиппеля – Фейля выраженной сколиотической деформации (рис. 9).

Таким образом, персонификация передних пластин позволяет выполнять фиксацию в условиях, при которых использование серийных изделий невозможно.

Мостовидные передние имплантаты

Оригинальное решение проблемы прогрессирующей кифотической деформации на фоне многоуровневого остеолита тел позвонков при нейрофиброматозе и болезни Горхема предложено Willemsen et al. [9, 46]. После дорсальной стабилизации (во всех трех случаях ревизионной) опороспособность передних структур восстанавливалась индивидуальным имплантатом, представляющим собой колонну с контактными площадками, фиксируемую винтами



Рис. 9

Индивидуальная передняя пластина. Авторский рисунок

к телам выше- и нижележащего непокрытых позвонков (рис. 10).

При наиболее протяженной зоне остеолита (C_7 – Th_{10}) авторам удалось, используя двойной доступ, успешно стабилизировать практически весь грудной отдел. В случае неопухолевой протяженной деструкции мостовидный имплантат без сомнения является прекрасной альтернативной многоуровневой корпорэктомии и костной пластикой.

«Монолитные» имплантаты

Общее техническое решение объединяет два непохожих друг на друга случая, в которых перед оператором стояли совершенно разные задачи. Thayararan et al. [43] столкнулись с необходимостью выполнить ревизионную стабилизацию пояснично-крестцового перехода, причем установка винтов в S_1 была невозможна, а передний доступ противопоказан. Авторами было принято решение создать нижнюю опорную базу из одного крестцового (на уровне S_2) и двух подвздошных винтов с каждой стороны. Для коммутации конструкции использовали индивидуальные имплантаты, представляющие собой стержни заданной конфигурации с «ветвями» для каждого из подвздошных винтов. Li et al. [42] столкнулись с несостоятельностью покровов в области паравerteбрального коннектора, соединявшего

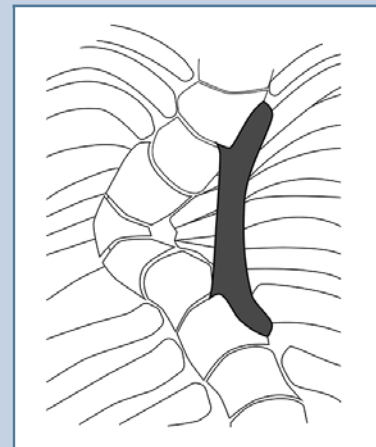


Рис. 10

Передний мостовидный имплантат. Авторский рисунок

подвздошный крюк и дистальный компонент дистракционной системы «ребро–таз» у пациента с врожденным кифозом на фоне менингомиелоцеле. Обнажившийся коннектор был удален, а подвздошная опора и дистальный компонент конструкции заменены на «монолитное» (без соединительного узла) низкопрофильное индивидуальное изделие (рис. 11).

Если в первом случае задача принципиально могла быть решена с помощью громоздкой и неудобной в работе конструкции из серийных элементов, то при несостоятельности покровов в области коннектора трудно представить себе другое столь же простое и элегантное решение.

Анализ опубликованных данных позволяет выделить следующие преимущества индивидуальных имплантатов. В определенных типичных ситуациях использование персонифицированных изделий по сравнению с серийными устройствами доказательно либо предположительно обеспечивает лучшие результаты (реконструктивные имплантаты для верхнешейного отдела, конгруэнтные межтеловые и телозамещающие имплантаты). При решении некоторых редких задач, для которых серийные изделия непригодны, применение

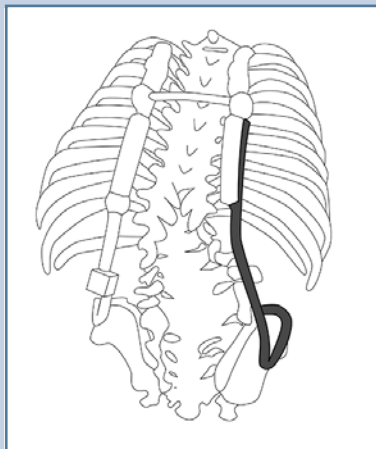


Рис. 11
«Монолитный» имплантат. Авторский рисунок

индивидуальных устройств является оптимальным вариантом (мостовидные имплантаты, передние пластины). Необходимо отметить, что провести ясную границу между этими вариантами не всегда возможно. Дополнительной положительной чертой персонализированных изделий является обусловленная технологией изготовления (3D-печать) возможность придавать микропористую структуру, благоприятствующую остеоинтеграции [22, 24, 27, 33].

С другой стороны, оперативное вмешательство с использованием индивидуального имплантата предполагает продолжительный и трудоемкий этап предоперационного планирования, требующий участия квалифицированного персонала [8, 13, 14, 16, 19, 42]. Впрочем, как показали Mobbs et al. [45], при отлаженной логистике изделие может быть спроектировано, изготовлено и стерилизовано менее чем за 48 ч. Вторым существенным ограничением является необходимость следовать предельно жесткому плану операции, к которому, таким образом, предъявляются очень высокие требования. Hu et al. [24] в двух случаях были вынуждены отказаться от использования персонализированного изделия в связи с несопадением размеров имплантата и костного ложа, а Girolami et al. [20] прямо рекомендуют иметь альтернативный план операции с применением серийных изделий. Многие коллективы изготавливали несколько имплантатов с различными размерами: от двух-трех [6, 8, 9, 13, 15, 16, 21–23, 29, 31, 32, 34, 37, 41, 44, 45] до пяти [39] и даже 32 вариантов [27]. Только для четырех случаев приведены данные о том, какой вариант изделия был использован (меньший [37], совпадающий точно [9, 37], больший [9, 29]). Примечательно, что более редко

используемый в качестве материала РЕЕК, в отличие от титанового сплава, может быть модифицирован хирургическим инструментом во время операции [35].

Таким образом, использование индивидуальных имплантатов может служить важным дополнением к арсеналу хирурга в случае редкой проблемы, а для некоторых типичных задач является оптимальным решением.

Ограничения исследования связаны с поиском в малом количестве электронных баз данных, учетом источников только на английском и русском языках, исключением статей с недоступным полным текстом. Некоторые публикации могли быть не найдены по использованным ключевым словам.

Заключение

Индивидуальные имплантаты используются при несоответствии имеющихся серийных изделий поставленным задачам либо анатомическим особенностям пациента. Нозология в большинстве случаев представлена дегенеративными и онкологическими заболеваниями у лиц старшей возрастной группы. Наибольшим количеством наблюдений и публикаций располагают авторы из США, Китая, Австралии.

Литература/References

1. **Kabra DA, Garg DB.** Current applications of 3-dimensional printing in spine surgery. *J Orthop.* 2023;41:28–32. DOI: 10.1016/j.jor.2023.05.009
2. **Katiyar P, Boddapati V, Coury J, Roye B, Vitale M, Lenke L.** Three-dimensional printing applications in pediatric spinal surgery: a systematic review. *Global Spine J.* 2024;14:718–730. DOI: 10.1177/21925682231182341
3. **Liang W, Han B, Hai JJ, Hai Y, Chen L, Kang N, Yin P.** 3D-printed drill guide template, a promising tool to improve pedicle screw placement accuracy in spinal deformity surgery: a systematic review and meta-analysis. *Eur Spine J.* 2021;30:1173–1183. DOI: 10.1007/s00586-021-06739-x
4. **Yu C, Ou Y, Xie C, Zhang Y, Wei J, Mu X.** Pedicle screw placement in spinal neurosurgery using a 3D-printed drill guide template: a systematic review and meta-analysis. *J Orthop Surg Res.* 2020;15:1. DOI: 10.1186/s13018-019-1510-5
5. **Косулин А.В., Елякин Д.В., Лебедева К.Д., Сухомлинова А.Е., Козлова Е.А., Орехова А.Е.** Применение навигационного шаблона для прохождения ножки позвонка при транспедикулярной фиксации. *Педуамп.* 2019;10(3):45–50. [Kosulin AV, Elyakin DV, Lebedeva KD, Sukhomlinova AE, Kozlova EA, Orekhova AE. Navigation template for vertebral pedicle passage in transpedicular screw fixation. *Pediatrician (St. Petersburg).* 2019;10(3):45–50]. DOI: 10.17816/PED10345-50 EDN: YIQQNJ
6. **Amelot A, Colman M, Loret JE.** Vertebral body replacement using patient-specific three-dimensional-printed polymer implants in cervical spondylotic myelopathy: an encouraging preliminary report. *Spine J.* 2018;18:892–899. DOI: 10.1016/j.spinee.2018.01.019
7. **Chung KS, Shin DA, Kim KN, Ha Y, Yoon DH, Yi S.** Vertebral reconstruction with customized 3-dimensional-printed spine implant replacing large vertebral defect with 3-year follow-up. *World Neurosurg.* 2019;126:90–95. DOI: 10.1016/j.wneu.2019.02.020
8. **Li Y, Zheng G, Liu T, Liang Y, Huang J, Liu X, Huang J, Cheng Z, Lu S, Huang L.** Surgical resection of solitary bone plasmacytoma of atlas and reconstruction with 3-dimensional-printed titanium patient-specific implant. *World Neurosurg.* 2020;139:322–329. DOI: 10.1016/j.wneu.2020.04.041
9. **Willemssen K, Nizak R, Noordmans HJ, Castelein RM, Weinans H, Kruij MC.** Challenges in the design and regulatory approval of 3D-printed surgical implants: a two-case series. *Lancet Digit Health.* 2019;1:e163–e171. DOI: 10.1016/S2589-7500(19)30067-6

10. **Hu P, Du S, Wei F, Zhai S, Zhou H, Liu X, Liu Z.** Reconstruction after resection of C2 vertebral tumors: A comparative study of 3D-printed vertebral body versus titanium mesh. *Front Oncol.* 2022;12:1065303. DOI: 10.3389/fonc.2022.1065303
11. **Asghar J, Patel AI, Osorio JA, Smith JS, Small J, Mullin JP, Desai A, Temple-Wong M, Nicolau RJ.** Mismatch between pelvic incidence and lumbar lordosis after personalized interbody fusion: the importance of preoperative planning and alignment in degenerative spine diseases. *Int J Spine Surg.* 2024;18(S1):S24–S31. DOI: 10.14444/8638
12. **Smith JS, Mundis GM, Osorio JA, Nicolau RJ, Temple-Wong M, Lafage R, Bess S, Ames CP.** Analysis of personalized interbody implants in the surgical treatment of adult spinal deformity. *Global Spine J.* 2025;15:930–939. DOI: 10.1177/21925682231216926
13. **Mobbs RJ, Parr WCH, Choy WJ, McEvoy A, Walsh WR, Phan K.** Anterior lumbar interbody fusion using a personalized approach: Is custom the future of implants for anterior lumbar interbody fusion surgery? *World Neurosurg.* 2019;124:452–458.e1. DOI: 10.1016/j.wneu.2018.12.144
14. **Phan K, Sgro A, Maharaj MM, D'Urso P, Mobbs RJ.** Application of a 3D custom printed patient specific spinal implant for C1/2 arthrodesis. *J Spine Surg.* 2016;2:314–318. DOI: 10.21037/jss.2016.12.06
15. **Siu TL, Rogers JM, Lin K, Thompson R, Owbridge M.** Custom-made titanium 3-dimensional printed interbody cages for treatment of osteoporotic fracture-related spinal deformity. *World Neurosurg.* 2018;111:1–5. DOI: 10.1016/j.wneu.2017.11.160
16. **Spetzger U, Frasca M, Konig SA.** Surgical planning, manufacturing and implantation of an individualized cervical fusion titanium cage using patient-specific data. *Eur Spine J.* 2016;25:2239–2246. DOI: 10.1007/s00586-016-4473-9
17. **Thayaparan GK, Owbridge MG, Thompson RG, D'Urso PS.** Designing patient-specific 3D printed devices for posterior atlantoaxial transarticular fixation surgery. *J Clin Neurosci.* 2018;56:192–198. DOI: 10.1016/j.jocn.2018.06.038
18. **Baldassarre BM, Di Perna G, Portonero I, Penner F, Cofano F, Marco R, Marengo N, Garbossa D, Pecorari G, Zenga F.** Craniovertebral junction chordomas: Case series and strategies to overcome the surgical challenge. *J Craniovertebr Junction Spine.* 2021;12:420–431. DOI: 10.4103/jcvjs.jcvjs_87_21
19. **Choy WJ, Mobbs RJ, Wilcox B, Phan S, Phan K, Sutterlin CE 3rd.** 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. DOI: 10.1016/j.wneu.2017.05.133
20. **Giolami M, Boriani S, Bandiera S, Barbanti-Brodano G, Ghermandi R, Terzi S, Tedesco G, Evangelisti G, Pipola V, Gasbarrini A.** Biomimetic 3D-printed custom-made prosthesis for anterior column reconstruction in the thoracolumbar spine: a tailored option following en bloc resection for spinal tumors: Preliminary results on a case-series of 13 patients. *Eur Spine J.* 2018;27:3073–3083. DOI: 10.1007/s00586-018-5708-8
21. **Giolami M, Griffoni C, Asunis E, Falzetti L, Bandiera S, Barbanti Brodano G, Ghermandi R, Pipola V, Terzi S, Pesce E, Monopoli Forleo D, Cianchetti M, Fiore MR, Presutti L, Fini M, Gasbarrini A.** Custom-made 3D-printed implants for anterior column reconstruction in the upper cervical spine after intralesional excisional resection-report of 2 cases and literature review. *J Clin Med.* 2022;11:6058. DOI: 10.3390/jcm11206058
22. **He S, Yang X, Yang J, Ye C, Liu W, Wei H, Xiao J.** Customized “Whole-cervical-vertebral-body” reconstruction after modified subtotal spondylectomy of C2-C7 spinal tumor via piezoelectric surgery. *Oper Neurosurg.* 2019;17:580–587. DOI: 10.1093/ons/npz077
23. **He S, Ye C, Zhong N, Yang M, Yang X, Xiao J.** Customized anterior craniocervical reconstruction via a modified high-cervical retropharyngeal approach following resection of a spinal tumor involving C1-2/C1-3. *J Neurosurg Spine.* 2019;32:432–440. DOI: 10.3171/2019.8.SPINE19874
24. **Hu X, Kenan S, Cheng M, Cai W, Huang W, Yan W.** 3D-printed patient-customized artificial vertebral body for spinal reconstruction after total en bloc spondylectomy of complex multi-level spinal tumors. *Int J Bioprint.* 2022;8:576. DOI: 10.18063/ijb.v8i3.576
25. **Hunn SAM, Koefman AJ, Hunn AWM.** 3D-printed titanium prosthetic reconstruction of the C2 vertebra: techniques and outcomes of three consecutive cases. *Spine (Phila Pa 1976).* 2020;45:667–672. DOI: 10.1097/BRS.0000000000003360
26. **Lador R, Regev G, Salame K, Khashan M, Lidar Z.** Use of 3-dimensional printing technology in complex spine surgeries. *World Neurosurg.* 2020;133:e327–e341. DOI: 10.1016/j.wneu.2019.09.002
27. **Li X, Wang Y, Zhao Y, Liu J, Xiao S, Mao K.** Multilevel 3D printing implant for reconstructing cervical spine with metastatic papillary thyroid carcinoma. *Spine (Phila Pa 1976).* 2017;42:E1326–E1330. DOI: 10.1097/BRS.0000000000002229
28. **Mobbs RJ, Coughlan M, Thompson R, Sutterlin CE, Phan K.** The utility of 3D printing for surgical planning and patient-specific implant design for complex spinal pathologies: case report. *J Neurosurg Spine.* 2017;26:513–518. DOI: 10.3171/2016.9.SPINE16371
29. **Parr WCH, Burnard JL, Singh T, McEvoy A, Walsh WR, Mobbs RJ.** C3-C5 chordoma resection and reconstruction with a three-dimensional printed titanium patient-specific implant. *World Neurosurg.* 2020;136:226–233. DOI: 10.1016/j.wneu.2019.11.167
30. **Shkarubo AN, Kuleshov AA, Chernov IV, Vetrile MS, Lisyansky IN, Makarov SN, Ponomareno GP, Spyrou M.** 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. DOI: 10.1016/j.wneu.2017.09.124
31. **Sun Z, Yin M, Sun Y, Cheng M, Fang M, Huang W, Ma J, Yan W.** Customized multilevel 3D printing implant for reconstructing spine tumor: a retrospective case series study in a single center. *Orthop Surg.* 2022;14:2016–2022. DOI: 10.1111/os.13357
32. **Wei F, Li Z, Liu Z, Liu X, Jiang L, Yu M, Xu N, Wu F, Dang L, Zhou H, Li Z, Cai H.** Upper cervical spine reconstruction using customized 3D-printed vertebral body in 9 patients with primary tumors involving C2. *Ann Transl Med.* 2020;8:332. DOI: 10.21037/atm.2020.03.32
33. **Xu N, Wei F, Liu X, Jiang L, Cai H, Li Z, Yu M, Wu F, Liu Z.** 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:E50–E54. DOI: 10.1097/BRS.0000000000001179
34. **Yang X, Wan W, Gong H, Xiao J.** Application of individualized 3D-printed artificial vertebral body for cervicothoracic reconstruction in a six-level recurrent chordoma. *Türk Neurosurg.* 2020;30:149–155. DOI: 10.5137/1019-5149.JTN.25296-18.2
35. **Zaborovskii N, Masevnin S, Smekalenkov O, Murakhovsky V, Ptashnikov D.** Patient-specific 3D-Printed PEEK implants for spinal tumor surgery. *J Orthop.* 2024;62:99–105. DOI: 10.1016/j.jor.2024.10.024
36. **Керимбаев Т.Т., Алейников В.Г., Урунбаев Е.А., Туйғынов Ж.М., Кенжегулов Е.Н., Абишев Н.Б., Ошаев М.С.** Опыт применения 3D импланта при патологии позвоночника. *Нейрохирургия и неврология Казахстана.* 2023;(3):15–23. [Kerimbayev TT, Aleinikov VG, Urunbayev EA, Tuigynov ZhM, Kenzhegulov EN, Abishev NB, Oshaev MS. Experience of 3d implant application in spinal pathology. *Neurosurgery and Neurology of Kazakhstan.* 2023;(3):15–23]. DOI: 10.53498/24094498_2023_3_15 EDN: QTSNFC
37. **Amin T, Parr WCH, Natarajan P, Lennox A, Mobbs L, Mobbs RJ.** Anterior lumbar interbody fusion (ALIF) for lumbar hemivertebra in an adult using three-dimensional-printed patient-specific implants and virtual surgery planning: a technical report. *Surg Tech Dev.* 2023;12:199–210. DOI: 10.3390/std12040019
38. **Jackson TJ, Freedman BA, Morris JM, Currier BL, Nassr A.** Cervical myelopathy in a patient with Klippel-Feil syndrome treated with a patient-specific custom cervical spine locking plate. *Spinal Cord Ser Cases.* 2022;8:6. DOI: 10.1038/s41394-022-00478-x

39. Li Z, Zhou F, Zhai S, Xia T, Pan S, Zhang F, Zhang L, Chen J, Sun Y. Congenital cervical scoliosis treated with concave side distraction with three-dimensional printed titanium cage. *Orthop Surg.* 2023;15:2709–2715. DOI: 10.1111/os.13843
40. Pesante BD, Wellington IJ, Eastlack RK, Singh H. Multilevel customized 3D-printed titanium alloy interbody cages used to treat congenital scoliosis: a case report. *J Orthop Case Rep.* 2023;13:58–64. DOI: 10.13107/jocr.2023.v13i10.3936
41. Amin T, Lin H, Parr WCH, Lim P, Mobbs RJ. Revision of a failed C5-7 corpectomy complicated by esophageal fistula using a 3-dimensional-printed zero-profile patient-specific implant: a technical case report. *World Neurosurg.* 2021;151:29–38. DOI: 10.1016/j.wneu.2021.04.013
42. Li M, Alhani B, Newton-Ede M, Marks D, Jones M. Patient-specific 3D printing to replace components of a rib-to pelvis “Eiffel Tower” vertebral expanding prosthetic titanium rib system in an infant: a case report. *Eur Spine J.* 2023;32:2607–2614. DOI: 10.1007/s00586-022-07460-z
43. Thayaparan GK, Owbridge MG, Thompson RG, D’Urso PS. Designing patient-specific solutions using biomodelling and 3D-printing for revision lumbar spine surgery. *Eur Spine J.* 2019;28(Suppl 2):18–24. DOI: 10.1007/s00586-018-5684-z
44. Tredan DAM, Mobbs RJ, Maharaj M, Parr WCH. Combining virtual surgical planning and patient-specific 3D-printing as a solution to complex spinal revision surgery. *J Pers Med.* 2022;13:19. DOI: 10.3390/jpm13010019
45. Mobbs RJ, Parr WCH, Huang C, Amin T. Rapid personalised virtual planning and on-demand surgery for acute spinal trauma using 3D-printing, biomodelling and patient-specific implant manufacture. *J Pers Med.* 2022;12:997. DOI: 10.3390/jpm12060997
46. Willemssen K, Magre J, Mol J, Noordmans HJ, Weinans H, Hekman EEG, Kruyt MC. Vital role of in-house 3D lab to create unprecedented solutions for challenges in spinal surgery, practical guidelines and clinical case series. *J Pers Med.* 2022;12:395. DOI: 10.3390/jpm12030395
47. Dykhouse GL, Bratescu RA, Kashlan ON, McGrath L Jr, Hartl R, Elsayed GA. Trends in spinal implant utilization and pricing. *J Craniovertebr Junction Spine.* 2025;15:404–410. DOI: 10.4103/jcvjs.jcvjs_115_24

Статья поступила в редакцию 19.01.2026

Рецензирование пройдено 11.02.2026

Подписано в печать 18.02.2026

Received 19.01.2026

Review completed 11.02.2026

Passed for printing 18.02.2026

Дополнительная информация

Вклад авторов. А.В. Косулин – написание статьи, отбор источников, обязанности контактного автора; Д.В. Елякин – редактирование статьи, отбор источников; В.Г. Мироненко – анализ и обработка источников; А.В. Подрезова – анализ и обработка источников; А.Я. Слободина – анализ и обработка источников; У.И. Губина – анализ и обработка источников; К.О. Борисова – анализ и обработка источников; М.В. Зырянова – анализ и обработка источников; А.М. Шорохов – анализ и обработка источников. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой ее части.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах

✉ Артем Владимирович Косулин, канд. мед. наук, Россия, 194100, Санкт-Петербург, ул. Литовская, 2; eLibrary SPIN: 7609-0708; ORCID: 0000-0002-9505-222X; hackenlad@mail.ru

Дмитрий Викторович Елякин; ORCID: 0000-0002-6575-7464; dimaelkins@mail.ru

Валерия Геннадьевна Мироненко; ORCID: 0009-0006-6690-1604; valery22000@gmail.com

Александра Викторовна Подрезова; ORCID: 0009-0001-1135-6956; podrezane@yandex.ru

Анастасия Яковлевна Слободина; ORCID: 0009-0000-1625-8442; nastya_slobodina@mail.ru

Ульяна Ивановна Губина; ORCID: 0009-0009-2050-7056; gubinau7@gmail.com

Ксения Олеговна Борисова; ORCID: 0009-0007-2796-8432; borisova.ksyunya@icloud.com

Мария Вадимовна Зырянова; ORCID: 0009-0006-1873-2607; mariika2901@mail.ru

Артем Михайлович Шорохов; ORCID: 0009-0008-8461-8540; 010695art@mail.ru

Authors' Info

✉ Artem Vladimirovich Kosulin, MD, Cand. Sci. (Medicine); 2 Litovskaya str., Saint Petersburg, 194100, Russia; eLibrary SPIN: 7609-0708; ORCID: 0000-0002-9505-222X; hackenlad@mail.ru

Dmitriy Viktorovich Elyakin; ORCID: 0000-0002-6575-7464; dimaelkins@mail.ru

Valeriya Gennadyevna Mironenko; ORCID: 0009-0006-6690-1604; valery22000@gmail.com

Aleksandra Viktorovna Podrezova; ORCID: 0009-0001-1135-6956; podrezane@yandex.ru

Anastasia Yakovlevna Slobodina; ORCID: 0009-0000-1625-8442; nastya_slobodina@mail.ru

Ulyana Ivanovna Gubina; ORCID: 0009-0009-2050-7056; gubinau7@gmail.com

Kseniya Olegovna Borisova; ORCID: 0009-0007-2796-8432; borisova.ksyunya@icloud.com

Mariya Vadimovna Zyryanova; ORCID: 0009-0006-1873-2607; mariika2901@mail.ru

Artem Mikhaylovich Shorokhov; ORCID: 0009-0008-8461-8540; 010695art@mail.ru