



## Проседание протезов тел позвонков при опухолях позвоночника: систематический обзор литературы

Н.С. Заборовский<sup>1,2</sup>, Ш.Л. Шайлиева<sup>1</sup>, С.В. Масевнин<sup>1</sup>, О.А. Смекалёнков<sup>1</sup>,  
 В.С. Мураховский<sup>1</sup>, Д.А. Пташников<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена»  
 Минздрава России, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> ФГБУЗ «Санкт-Петербургская клиническая больница Российской академии наук», г. Санкт-Петербург, Россия

### Реферат

**Актуальность.** Протезирование тел позвонков является одним из ключевых методов хирургического лечения опухолевых поражений позвоночника. Одним из наиболее распространенных его осложнений является проседание протеза тела позвонка.

**Цель обзора** — сравнить частоту проседания различных типов протезов тел позвонков при хирургическом лечении опухолевых поражений грудного и поясничного отделов позвоночника для определения оптимальных методов реконструкции позвоночного столба у пациентов с опухолями позвоночника.

**Материал и методы.** Проведен систематический обзор литературы в соответствии с рекомендациями PRISMA. Поиск осуществлялся в базах данных PubMed, Google Scholar и eLIBRARY. Были включены исследования, посвященные протезированию тел позвонков при опухолевых поражениях у пациентов 18 лет и старше, с четким определением проседания и анализом факторов риска. Анализировались различные типы имплантатов: раздвижные, сетчатые, серийные и индивидуальные 3D-протезы.

**Результаты.** В анализ включено 13 исследований (12 ретроспективных, 1 проспективное) с участием 661 пациента. Наибольшая частота проседания зафиксирована для титановых сетчатых протезов — от 63,8 до 71,4%. Раздвижные имплантаты продемонстрировали более благоприятные результаты с частотой проседания от 5,3 до 35,3%. Результаты применения 3D-имплантатов оказались наиболее противоречивыми, варьируя от 0 до 100% в различных исследованиях. Период наблюдения составлял от 7,4 до 101 мес.

**Заключение.** Раздвижные имплантаты демонстрируют наиболее благоприятные результаты в отношении частоты проседания при протезировании тел позвонков у пациентов с опухолями позвоночника. Высокая частота проседания титановых сетчатых протезов может быть обусловлена несоответствием модуля упругости имплантата и костной ткани. 3D-протезы требуют дальнейшего изучения для оптимизации их дизайна и клинического применения. Необходим индивидуальный подход к выбору типа протеза с учетом факторов риска.

**Ключевые слова:** протезирование тел позвонков; опухоли позвоночника; проседание имплантатов; раздвижные протезы; титановые сетчатые протезы; 3D-имплантаты; спондилэктомия.

 **Для цитирования:** Заборовский Н.С., Шайлиева Ш.Л., Масевнин С.В., Смекалёнков О.А., Мураховский В.С., Пташников Д.А. Проседание протезов тел позвонков при опухолях позвоночника: систематический обзор литературы. *Травматология и ортопедия России*. 2025;31(4):179-188. <https://doi.org/10.17816/2311-2905-17750>.

 Заборовский Никита Сергеевич; e-mail: n.zaborovskii@yandex.ru

Рукопись получена: 30.07.2025. Рукопись одобрена: 18.09.2025. Статья опубликована онлайн: 24.10.2025

© Эко-Вектор, 2025



## Subsidence of Vertebral Body Replacement Prostheses in Spinal Tumors: A Systematic Review

Nikita S. Zaborovskii<sup>1,2</sup>, Sheridan L. Shailieva<sup>1</sup>, Sergei V. Masevnni<sup>1</sup>, Oleg A. Smekalenkov<sup>1</sup>, Vladislav S. Murakhovsky<sup>1</sup>, Dmitrii A. Ptashnikov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Vreden National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> St. Petersburg Clinical Hospital of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

### Abstract

**Background.** Vertebral body replacement is one of the key surgical methods for the treatment of spinal tumors. One of its most common complications is vertebral body implant subsidence.

**The aim of the review** — to compare the subsidence rates of various types of vertebral body implants used in the surgical treatment of thoracic and lumbar spinal tumors in order to determine the optimal reconstruction methods for patients with spinal tumors.

**Methods.** A systematic literature review was conducted in accordance with the PRISMA guidelines. The search was performed in the PubMed, Google Scholar, and eLIBRARY databases. Studies were included if they involved vertebral body replacement in patients aged 18 years and older with oncologic lesions, provided a clear definition of subsidence, and analyzed risk factors. Various implant types were evaluated, including expandable, mesh, 3D-printed commercial, and patient-specific prostheses.

**Results.** Thirteen studies were included in the analysis (12 retrospective and 1 prospective) comprising a total of 661 patients. The highest subsidence rates were observed with titanium mesh cages, ranging from 63.8 to 71.4%. Expandable implants demonstrated more favorable outcomes, with subsidence rates from 5.3 to 35.3%. The results for 3D-printed implants were the most inconsistent, ranging from 0 to 100% across studies. The follow-up period varied from 7.4 to 101 months.

**Conclusions.** Expandable implants demonstrate the most favorable subsidence rates in vertebral body replacement for patients with spinal tumors. The high subsidence rates of titanium mesh cages may be attributed to a mismatch between the elastic modulus of the implant and bone tissue. 3D-printed implants require further investigation to optimize their design and clinical use. An individualized approach to prosthesis selection considering risk factors is essential.

**Keywords:** vertebral body replacement; spinal tumors; implant subsidence; expandable implants; titanium mesh cages; 3D-printed implants; spondylectomy.

---

**Cite as:** Zaborovskii N.S., Shailieva Sh.L., Masevnni S.V., Smekalenkov O.A., Murakhovsky V.S., Ptashnikov D.A. Subsidence of Vertebral Body Replacement Prostheses in Spinal Tumors: A Systematic Review. *Traumatology and Orthopedics of Russia*. 2025;31(4):179-188. (In Russian). <https://doi.org/10.17816/2311-2905-17750>.

✉ Nikita S. Zaborovskii; e-mail: n.zaborovskii@yandex.ru

Submitted: 30.07.2025. Accepted: 18.09.2025. Published online: 24.10.2025.

© Eco-Vector, 2025

## ВВЕДЕНИЕ

Протезирование тел позвонков является одним из ключевых методов хирургического лечения опухолевых поражений позвоночника. Данное вмешательство обеспечивает восстановление опорной функции и стабильности позвоночного столба после резекции пораженного позвонка [1, 2]. Долгосрочная эффективность метода во многом определяется стабильностью установленного имплантата и его интеграцией с прилежащими костными структурами [3]. Проседание протеза тела позвонка представляет собой одно из наиболее распространенных осложнений, которое может приводить к нарушению сагиттального баланса, компрессии нервных структур, болевому синдрому и, в конечном итоге, к необходимости ревизионного вмешательства [4].

Оценка частоты проседания имплантатов и выявление факторов, влияющих на развитие данного осложнения, имеет критическое значение для оптимизации хирургической тактики и улучшения отдаленных результатов лечения [5]. В современной спинальной хирургии используется широкий спектр протезов тел позвонков, включая традиционные титановые сетчатые конструкции, раздвижные имплантаты, а также инновационные и индивидуально изготовленные 3D-протезы [6]. Каждый тип имплантата обладает уникальными биомеханическими характеристиками, которые могут по-разному влиять на риск развития проседания.

Несмотря на значительный прогресс в разработке новых типов имплантатов, в литературе отсутствует систематизированная информация о сравнительной эффективности различных протезов тел позвонков в отношении частоты проседания при опухолевых поражениях позвоночника.

**Цель обзора** — сравнить частоту проседания различных типов протезов тел позвонков при хирургическом лечении опухолевых поражений грудного и поясничного отделов позвоночника для определения оптимальных методов реконструкции позвоночного столба у пациентов с опухолями позвоночника.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Настоящее исследование представляет собой систематический обзор литературы, проведенный в соответствии с рекомендациями PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Поиск литературы осуществлялся в электронных базах данных PubMed, Google Scholar и eLIBRARY на русском и английском языках

с использованием следующих ключевых слов: протезирование тел позвонков, протез тела позвонка, реконструкция тел позвонков, опухоли позвоночника, опухоли позвонков, метастазы позвоночника, проседание имплантата, проседание протеза, проседание кейджа, спондилэктомия, корпектомия, вертебрэктомия, титановая сетка, раздвижной имплантат, 3D-протез, реконструкция позвоночника, передний спондилодез; vertebral body replacement, vertebral body prosthesis, vertebral body reconstruction, spinal tumor, spine tumor, vertebral tumor, spinal metastases, implant subsidence, prosthesis subsidence, cage subsidence, spondylectomy, corpectomy, vertebrectomy, titanium mesh, expandable cage, 3D printed implant, spinal reconstruction, anterior spinal fusion. Первоначальный поиск выявил 1054 потенциально релевантных статей (рис. 1).

Для отбора исследований использовался метод PICO (Population, Intervention, Comparison, Outcome). Популяция (P) включала взрослых пациентов (18 лет и старше) с первичными или метастатическими опухолями в грудном и/или поясничном отделах позвоночника. Вмешательство (I) представляло собой протезирование тел позвонков с использованием различных типов имплантатов (раздвижные, сетчатые, 3D серийные или индивидуальные). Сравнение (C) проводилось между различными типами имплантатов. Основным исходом (O) являлась частота проседания имплантатов.

### Критерии включения:

- 1) язык публикации — английский или русский;
- 2) период публикации — с 2010 по 2025 г. включительно;
- 3) дизайн — рандомизированное контролируемое исследование, когортное исследование, исследование случай-контроль или серии случаев с не менее чем 10 пациентами;
- 4) доступность полнотекстовой версии статьи.

**Критерии исключения:** обзорные статьи, редакционные статьи, письма в редакцию, тезисы конференций.

В обзор включали исследования, фокусирующиеся на протезировании тел позвонков при опухолевых поражениях, содержащие четкое определение и методы измерения проседания, а также анализ факторов риска, связанных с проседанием. Исключались исследования, посвященные исключительно травматическим повреждениям или инфекционным заболеваниям позвоночника, дублирующие публикации.



Рисунок 1. Блок-схема поиска и отбора публикаций

Figure 1. Flow diagram of article search and selection

Два независимых исследователя проводили скрининг заголовков и абстрактов, а затем — полнотекстовый анализ отобранных статей. Разногласия разрешались путем обсуждения с привлечением третьего исследователя при необходимости. Из каждого включенного исследования извлекались следующие данные: дизайн исследования, характеристики пациентов (количество, возраст, пол, тип и локализация опухоли), тип имплантата, определение и методы измерения проседания, частота проседания, факторы риска и длительность наблюдения.

Анализ данных проводился с использованием количественных показателей и описательных методов. Особое внимание уделялось сравнению частоты проседания между различными типами имплантатов и анализу факторов риска, связанных с проседанием.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе систематического обзора литературы было проанализировано 13 исследований, посвященных протезированию тел позвонков при опухолевых поражениях позвоночника. Подавляющее большинство (12 из 13) исследований имели ретроспективный дизайн, и только одно исследование было проспективным. Преобладание ретроспектив-

ного дизайна может ограничивать возможность установления причинно-следственных связей на основе полученных результатов (табл. 1).

Информация о типе опухоли была представлена в 11 из 13 исследований. В этих 11 исследованиях участвовали 258 пациентов с первичными опухолями и 267 пациентов с метастатическими поражениями. Для 136 пациентов из двух исследований тип опухоли не был указан. Смешанный характер опухолевых поражений (первичные и метастатические) в анализируемых исследованиях свидетельствует о разнородности популяции пациентов, что может влиять на возможность экстраполяции результатов на конкретные типы опухолей.

Относительно типов используемых имплантатов 3D-протезы тел позвонков упоминались наиболее часто — в 7 из 13 исследований. Титановые сетчатые протезы использовались в четырех исследованиях, раздвижные имплантаты — в трех, индивидуально изготовленные протезы — в пяти, а имплантаты полимерного волокна (CFR PEEK) — в двух исследованиях. Разнообразие используемых типов имплантатов отражает эволюционный характер технологий протезирования позвоночника и может затруднять прямое сравнение результатов между исследованиями.

Таблица 1

## Характеристика включенных исследований

Исследование	Дизайн исследования	Популяция пациентов	Тип имплантата	Период наблюдения
Viswanathan A. et al., 2012 [7]	Ретроспективное когортное исследование	95 пациентов (24% — с первичными, 76% — с метастатическими)	Раздвижной титановый протез	Медиана 7,4 мес. (диапазон 1–62 мес.)
Yoshioka K. et al., 2017 [8]	Ретроспективное когортное исследование	47 пациентов (15 — с первичными опухолями позвоночника, 32 — с метастатическими)	Титановый сетчатый протез	Среднее 70,2 мес. (диапазон 17–120 мес.)
Girolami M. et al., 2018 [9]	Проспективная серия случаев	13 пациентов (8 — с первичными опухолями костей, 5 — с солитарными метастазами)	Индивидуальный титановый 3D-протез	Среднее 10 мес. (диапазон 2–16 мес.)
Li Z. et al., 2020 [10]	Ретроспективное когортное исследование	30 пациентов (23 — с первичными опухолями позвоночника, 7 — с метастатическими)	Титановый сетчатый протез	Среднее 41,8 мес. (диапазон 13–120 мес.)
Tang X. et al., 2021 [11]	Ретроспективное когортное исследование	27 пациентов (преимущественно с первичными опухолями позвоночника, 4 — с метастатическими)	Модульный 3D-протез	Среднее 22 мес. (диапазон 12–41 мес.)
Shen F.H. et al., 2022 [12]	Серия случаев, ретроспективный многоцентровой обзор	13 пациентов (8 — с первичными опухолями, 5 — с метастатическими)	Индивидуальный имплантат из CFR PEEK	Среднее 8 мес. (диапазон 1–21 месяцев)
Zhou H. et al., 2022 [13]	Ретроспективное когортное исследование, серия случаев	23 пациента (18 — с первичными опухолями позвоночника, 5 — с метастатическими)	3D (индивидуальные и серийные)	Медиана 37 мес. (диапазон 24–58 мес.)
Cao Y. et al., 2023 [14]	Ретроспективное когортное исследование, сравнительное исследование	20 пациентов с метастазами в грудопоясничном отделе	Искусственный 3D-протез	Медиана 21,8 мес. (диапазон 12–38 мес.)
Chen Z. et al., 2023 [15]	Ретроспективное сравнительное исследование	35 пациентов (26 — с первичными злокачественными опухолями, 9 — с метастатическими)	Серийный 3D-протез, титановый сетчатый протез	Среднее 24,6 мес. (диапазон 12–60 мес.)
Shimizu T. et al., 2023 [16]	Ретроспективное когортное исследование	136 пациентов (тип опухоли не указан)	Титановый сетчатый протез	Среднее 101 мес. (диапазон 36–232 мес.)
Hu J. et al., 2023 [17]	Ретроспективное когортное исследование	51 пациент (33 — с первичными опухолями, 18 — с метастатическими)	3D (индивидуальные и серийные)	Медиана 21 мес. (диапазон 7–57 мес.)
Hu X. et al., 2023 [18]	Ретроспективное когортное исследование	145 пациентов (79 — с первичными опухолями позвоночника, 66 — с метастатическими)	Титановый сетчатый протез, раздвижной титановый протез, индивидуальный 3D-протез	Среднее 53,61 мес. (диапазон 12–149 мес.)
Schwendner M. et al., 2023 [19]	Ретроспективное когортное исследование, серия случаев	25 пациентов (8% — с первичной опухолью позвоночника, 92% — с метастатической)	Раздвижной протез из полиэфирэфиркетона, армированный углеродным волокном (CFR PEEK)	Медиана 295 дней (диапазон 13–491 дней)

Продолжительность периода наблюдения также варьировалась в исследованиях. В 5 из 13 исследований указывалась медиана периода наблюдения, которая составляла от 7,4 до 37 мес. (с учетом перевода дней в месяцы для исследования M. Schwendner с соавторами). В 8 из 13 исследований указывалось среднее значение периода наблюдения от 8 до 101 месяцев. Широкий диапазон продолжительности наблюдения может оказывать влияние на регистрацию отдаленных результатов и осложнений в различных исследованиях.

Показатели проседания имплантатов значительно варьировались в зависимости от типа используемого протеза тела позвонка. Для титановых сетчатых протезов частота проседания составила от 63,8 до 71,4%, что было зафиксировано в исследованиях K. Yoshioka с соавторами и Z. Chen с соавторами соответственно [8, 15]. В исследовании Z. Chen с соавторами также оценивалась эффективность 3D-печатного стандартного протеза, для которого частота проседания составила 64,3% [15].

Раздвижные имплантаты продемонстрировали различные показатели проседания. В исследовании A. Viswanathan с соавторами для титанового имплантата этот показатель составил 12,6%, в то время как в работе M. Schwendner с соавторами для имплантата из полиэфирэфиркетона, армированного углеродными волокнами (CFR PEEK), частота проседания достигала 35,3% [7, 19].

Результаты применения 3D-имплантатов были неоднородными. В исследовании X. Ni с соавторами не было зарегистрировано случаев проседания среди 51 пациента, которому были установлены 3D-протезы (как индивидуальные, так и стандартные) [18]. В исследовании F.H. Shen с соавторами также не наблюдалось проседания при использовании имплантатов из CFR PEEK с индивидуальными контактными поверхностями из титана [12]. Однако в исследовании M. Girolami с соавторами было зафиксировано проседание у всех пациентов (100%), которым были установлены индивидуальные титановые 3D-протезы [9]. В работе H. Zhou с соавторами частота проседания 3D-имплантатов составила 21,7%, а в исследовании X. Tang с соавторами для модульного 3D-протеза — 38,5% [11, 13] (табл. 2).

Степень проседания варьировалась в исследованиях: от миграции имплантата более чем на 1 мм до потери высоты сегмента более чем на 3 мм. Время обнаружения проседания также варьировалось — от непосредственного послеоперационного периода до окончательного наблюдения. В большинстве исследований проседание оценивалось через месяц после операции или во время последующего наблюдения.

Таблица 2

#### Показатели проседания в зависимости от типа имплантата

Исследование	Тип имплантата	Частота проседания	Определение проседания	Время обнаружения
Viswanathan A. et al., 2012 [7]	Раздвижной титановый протез	12/95 (12,6%)	> 1 мм миграции	Непосредственно после операции и более чем через 30 дней
Yoshioka K. et al., 2017 [8]	Титановый сетчатый протез	30/47 (63,8%)	> 2 мм	Через месяц после операции
Girolami M. et al., 2018 [9]	Индивидуальный титановый 3D-протез	13/13 (100%)	4,3±5,7 мм	При последнем наблюдении
Li Z. et al., 2020 [10]	Титановый сетчатый протез	8/52 (15,4%)	10,9±4,5 мм	При последнем наблюдении
Tang X. et al., 2021 [11]	Модульный 3D-протез	10/26 (38,5%)	> 2 мм миграции	В течение периода наблюдения
Shen F.H. et al., 2022 [12]	Индивидуальный CFR PEEK имплантат	0/13 (0%)	Не применимо	Не применимо
Zhou H. et al., 2022 [13]	3D индивидуальные	1/10 (10%)	> 2 мм миграции	При последнем наблюдении
Cao Y. et al., 2023 [14]	3D серийные	4/13 (30,8%)	> 2 мм миграции	При последнем наблюдении
	3D самостабилизирующийся искусственный позвонок	7/10 (70%)	1,8±2,1 мм	При последнем наблюдении
	Титановый сетчатый протез	9/10 (90%)	5,2±5,1 мм	При последнем наблюдении

Окончание таблицы 2

Исследование	Тип имплантата	Частота проседания	Определение проседания	Время обнаружения
Chen Z. et al., 2023 [15]	Серийный 3D-протез	9/14 (64,3%)	Снижение средней высоты позвонка более 3 мм	При последнем наблюдении
	Титановый сетчатый протез	15/21 (71,4%)	Потеря средней высоты позвонка > 3 мм	При последнем наблюдении
Shimizu T. et al., 2023 [16]	Титановый сетчатый протез	44/136 (32,4%)	2–18 мм	Через месяц после операции
Hu J. et al., 2023 [17]	3D (индивидуальные и серийные)	0/51 (0%)	Не применимо	Не применимо
Hu X. et al., 2023 [18]	Титановый сетчатый протез	18/70 (25,7%)	Не указано	При последнем наблюдении
	Раздвижной титановый протез	4/75 (5,3%)	Не указано	При последнем наблюдении
Schwendner M. et al., 2023 [19]	Раздвижной CFR PEEK имплантат	6/17 (35,3%)	3,8±3,1 (1–8) мм	При последнем наблюдении

Показатели нестабильности имплантатов были представлены в 12 из 13 исследований. Зарегистрированные показатели нестабильности варьировались от 0 до 32,4%, что свидетельствует о значительной вариабельности эффективности имплантатов в различных исследованиях. Информация о сроках возникновения нестабильности имплантата была представлена только в трех исследованиях: в одном сообщалось о среднем времени 37,41 мес., в другом — о медиане времени 31 мес., а в третьем были указаны конкретные сроки — 24 и 36 мес. В 9 исследованиях информация о сроках возникновения нестабильности отсутствовала, а в одном этот параметр был не применим в связи с отсутствием случаев нестабильности. Отсутствие последовательного представления данных о сроках развития нестабильности ограничивает возможность формулирования выводов о долгосрочной эффективности различных типов имплантатов.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Настоящий систематический обзор представляет первый комплексный анализ проседания протезов тел позвонков при опухолевых поражениях позвоночника, охватывающий различные типы имплантатов и результаты их клинического использования. Полученные данные демонстрируют значительную вариабельность частоты проседания между различными типами протезов, что имеет важные клинические последствия для выбора оптимального метода реконструкции позвоночника у онкологических пациентов.

Наиболее высокие показатели проседания были зафиксированы при использовании титановых сетчатых протезов — 15,4–90,0%. Эти

результаты согласуются с данными литературы о высокой частоте проседания титановых имплантатов, особенно в условиях остеопороза или ослабленных замыкательных пластинок [20]. Высокая частота проседания титановых сетчатых протезов может быть обусловлена несоответствием модуля упругости между имплантатом и костной тканью, а также концентрацией напряжений на относительно небольшой площади контакта с замыкательными пластинками. Полученные результаты согласуются с данными биомеханических исследований, демонстрирующих, что высокий модуль упругости титана создает неблагоприятные условия для распределения механических нагрузок в системе «имплантат — кость», особенно у пациентов с компрометированным качеством костной ткани вследствие онкологического процесса [21, 22].

Раздвижные протезы продемонстрировали более благоприятные результаты с частотой проседания 5,3–35,3%. Преимущество раздвижных конструкций заключается в возможности точного восстановления высоты позвоночного сегмента и равномерного распределения нагрузки по замыкательным пластинкам. Кроме того, раздвижные имплантаты позволяют хирургу корректировать высоту интраоперационно, что способствует оптимальному контакту с костными структурами.

Результаты применения 3D-имплантатов оказались наиболее противоречивыми, варьируя от 0 до 100% в различных исследованиях. Такая значительная вариабельность может быть объяснена различиями в дизайне имплантатов, материалах изготовления и индивидуальных характеристиках пациентов. Индивидуализированные 3D-протезы теоретически должны обеспечивать лучшее со-

ответствие анатомии пациента, однако клинические результаты не всегда подтверждают это предположение.

Стандартным материалом для изготовления индивидуальных 3D-имплантатов является титановый сплав, который, несмотря на свою биосовместимость и прочность, обладает существенными биомеханическими недостатками. Даже пористые титановые конструкции демонстрируют значительное несоответствие модуля упругости по сравнению с костной тканью — модуль упругости титана составляет приблизительно 110 ГПа, в то время как для кости этот показатель варьирует от 3,78 до 14,64 ГПа [22, 23]. Это несоответствие приводит к развитию эффекта экранирования напряжения (стресс-шилдинг), при котором более жесткий имплантат принимает на себя основную нагрузку, что приводит к снижению механической стимуляции окружающей костной ткани. Согласно закону Вольфа, недостаточная механическая нагрузка на кость вызывает ее резорбцию и ослабление, что в конечном итоге способствует развитию проседания имплантата и нестабильности конструкции [24]. Кроме того, концентрация напряжений на относительно небольшой площади контакта между жестким титановым имплантатом и ослабленными замыкальными пластинками позвонков создает дополнительные предпосылки для проседания. В условиях онкологической патологии, когда качество костной ткани уже скомпрометировано опухолевым процессом, химиотерапией или лучевой терапией, эти биомеханические факторы становятся еще более критичными.

Парадоксально, но индивидуализация геометрии 3D-протезов, которая должна была решить проблему оптимального распределения нагрузки, не устраняет принципиального несоответствия

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

### Заявленный вклад авторов

**Зaborовский Н.С.** — концепция и дизайн исследования, написание и редактирование текста рукописи.

**Шайлиева Ш.Л.** — концепция и дизайн исследования, написание и редактирование текста рукописи.

**Масевнин С.В.** — поиск и анализ литературы, написание и редактирование текста рукописи.

**Смекалёнков О.А.** — поиск и анализ литературы, статистическая обработка данных, анализ и интерпретация данных.

**Мураховский В.С.** — поиск и анализ литературы, статистическая обработка данных, анализ и интерпретация данных.

**Пташников Д.А.** — научное руководство, редактирование текста рукописи.

Все авторы прочли и одобрили финальную версию рукописи статьи. Все авторы согласны нести ответственность за все аспекты работы, чтобы обеспечить надлежащее рассмотрение и решение всех возможных вопросов, связанных с корректностью и надежностью любой части работы.

механических свойств материала. Это объясняет то, почему даже анатомически точные индивидуальные имплантаты могут демонстрировать высокие показатели проседания, как было показано в исследовании M. Girolami с соавторами, в котором частота проседания составила 100% [9]. Данная проблема подчеркивает необходимость разработки новых материалов для 3D-печати, таких как композиты на основе PEEK, которые могли бы обеспечить более близкое соответствие механических свойств костной ткани при сохранении преимуществ индивидуализированного дизайна.

### Ограничения

Настоящий систематический обзор имеет несколько ограничений. Во-первых, значительная гетерогенность включенных исследований по дизайну, популяции пациентов и типам имплантатов ограничивает возможность проведения количественного метаанализа. Во-вторых, различия в определении проседания и методах измерения затрудняют прямое сравнение результатов. В-третьих, относительно короткие периоды наблюдения в некоторых исследованиях могут не отражать долгосрочные результаты.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данный систематический обзор подчеркивает необходимость индивидуального подхода к выбору типа протеза тела позвонка у пациентов с опухолями позвоночника с учетом различных факторов риска. Развившиеся имплантаты демонстрируют наиболее благоприятные результаты в отношении частоты проседания, в то время как 3D-протезы требуют дальнейшего изучения для оптимизации их дизайна и клинического применения.

### DISCLAIMERS

#### Author contribution

**Zaborovskii N.S.** — study concept and design, drafting and editing the manuscript.

**Shailieva Sh.L.** — study concept and design, drafting and editing the manuscript.

**Masevnnin S.V.** — literature search and review, drafting and editing the manuscript.

**Smekalenkov O.A.** — literature search and review, statistical data processing, data analysis and interpretation.

**Murakhovsky V.S.** — literature search and review, statistical data processing, data analysis and interpretation.

**Ptashnikov D.A.** — scientific guidance, editing the manuscript.

All authors have read and approved the final version of the manuscript of the article. All authors agree to bear responsibility for all aspects of the study to ensure proper consideration and resolution of all possible issues related to the correctness and reliability of any part of the work.

**Источник финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Возможный конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Этическая экспертиза.** Не применима.

**Информированное согласие на публикацию.** Не требуется.

**Генеративный искусственный интеллект.** При создании статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

## ЛИТЕРАТУРА [REFERENCES]

1. Усиков В.Д., Пташников Д.А., Магомедов Ш.Ш. Корпор- и спондилэктомия в системе хирургического лечения опухолей позвоночника. *Травматология и ортопедия России* 2010;(2):140-142. doi: 10.21823/2311-2905-2010-0-2-140-142. Usikov V.D., Ptashnikov D.A., Magomedov Sh.Sh. Corpor- and spondylectomy in system of surgical treatment of vertebral tumors. *Traumatology and Orthopedics of Russia*. 2010;(2):140-142. (In Russian). doi: 10.21823/2311-2905-2010-0-2-140-142.
2. Заборовский Н.С., Пташников Д.Ф., Топузов Э.Э., Левченко Е.В., Михайлов Д.А., Наталенко К.Е. Эпидемиология опухолей позвоночника у пациентов, получивших специализированную ортопедическую помощь. *Травматология и ортопедия России*. 2019;25(1):104-112. doi: 10.21823/2311-2905-2019-25-1-104-112. Zaborovsky N.S., Ptashnikov D.A., Topuzov E.E., levchenko E.V., Mikhaylov D.A., Natalenko K.E. Spine Tumor Epidemiology in Patients who Underwent Orthopaedic Surgery. *Traumatology and Orthopedics of Russia*. 2019;25(1):104-112. (In Russian). doi: 10.21823/2311-2905-2019-25-1-104-112.
3. Заборовский Н.С., Масевнин С.В., Мураховский В.С., Мухиддинов Р.А., Смекалёнков О.А., Пташников Д.А. Факторы риска нестабильности имплантатов после спондилэктомии у пациентов с опухолями позвоночника. *Гений ортопедии*. 2025;31(2): 183-193. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-2-183-193. Zaborovskii N.S., Masevnni S.V., Murakhovskiy V.S., Mukhiddinov R.A., Smekalyonkov O.A., Ptashnikov D.A. Risk factors for hardware failure after total spondylectomy in patients with spinal tumors. *Genij Orthopedii*. 2025;31(2):183-193. (In Russian). doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-2-183-193.
4. Berjano P., Cecchinato R., Pun A., Boriani S. Revision surgery for tumors of the thoracic and lumbar spine: causes, prevention, and treatment strategy. *Eur Spine J.* 2020;29(Suppl 1):66-77. doi: 10.1007/s00586-019-06276-8.
5. Zaborovskii N., Schlauch A., Ptashnikov D., Mikaylov D., Masevnni S., Smekalenkov O. et al. Hardware Failure in Spinal Tumor Surgery: A Hallmark of Longer Survival? *Neurospine*. 2022;19(1):84-95. doi: 10.14245/ns.2143180.590.
6. Kasapovic A., Bornemann R., Pflugmacher R., Rommelspacher Y. Implants for Vertebral Body Replacement – Which Systems are Available and Have Become Established. *Z Orthop Unfall*. 2021;159(1):83-90. (In German). doi: 10.1055/a-1017-3968.
7. Viswanathan A., Abd-El-Barr M.M., Doppenberg E., Suki D., Gokaslan Z., Mendel E. et al. Initial experience with the use of an expandable titanium cage as a vertebral body replacement in patients with tumors of the spinal column: a report of 95 patients. *Eur Spine J.* 2012;21(1):84-92. doi: 10.1007/s00586-011-1882-7.
8. Yoshioka K., Murakami H., Demura S., Kato S., Yokogawa N., Kawahara N. et al. Risk factors of instrumentation failure after multilevel total en bloc spondylectomy. *Spine Surg Relat Res*. 2017;1(1):31-39. doi: 10.22603/ssrr.1.2016-0005.
9. Girolami M., Boriani S., Bandiera S., Barbanti-Bródano G., Ghermandi R., Terzi S. et al. 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(12):3073-3083. doi: 10.1007/s00586-018-5708-8.
10. Li Z., Wei F., Liu Z., Liu X., Jiang L., Yu M. et al. Risk Factors for Instrumentation Failure After Total En Bloc Spondylectomy of Thoracic and Lumbar Spine Tumors Using Titanium Mesh Cage for Anterior Reconstruction. *World Neurosurg*. 2020;135:e106-e115. doi: 10.1016/j.wneu.2019.11.057.
11. Tang X., Yang Y., Zang J., Du Z., Yan T., Yang R. et al. Preliminary Results of a 3D-Printed Modular Vertebral Prosthesis for Anterior Column Reconstruction after Multilevel Thoracolumbar Total En Bloc Spondylectomy. *Orthop Surg*. 2021;13(3):949-957. doi: 10.1111/os.12975.
12. Shen F.H., Gasbarrini A., Lui D.F., Reynolds J., Capua J., Boriani S. Integrated Custom Composite Polyetheretherketone/Carbon fiber (PEEK/CF) Vertebral Body Replacement (VBR) in the Treatment of Bone Tumors of the Spine: A Preliminary Report From a Multicenter Study. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2022; 47(3):252-260. doi: 10.1097/BRS.0000000000004177.
13. Zhou H., Liu S., Li Z., Liu X., Dang L., Li Y. et al. 3D-printed vertebral body for anterior spinal reconstruction in patients with thoracolumbar spinal tumors. *J Neurosurg Spine*. 2022;37(2):274-282. doi: 10.3171/2022.1.SPINE21900.
14. Cao Y., Yang N., Wang S., Wang C., He Q., Wu Q. et al. The application of 3D-printed auto-stable artificial vertebral body in en bloc resection and reconstruction of thoracolumbar metastases. *J Orthop Surg Res*. 2023;18(1):638. doi: 10.1186/s13018-023-04135-3.
15. Chen Z., Lü G., Wang X., He H., Yuan H., Pan C. et al. Is 3D-printed prosthesis stable and economic enough for anterior spinal column reconstruction after spinal tumor resection? A retrospective comparative study between 3D-printed off-the-shelf prosthesis and titanium mesh cage. *Eur Spine J.* 2023;32(1):261-270. doi: 10.1007/s00586-022-07480-9.

**Funding source.** This study was not supported by any external sources of funding.

**Disclosure competing interests.** The authors declare that they have no competing interests.

**Ethics approval.** Not applicable.

**Consent for publication.** Not required.

**Use of artificial intelligence.** No generative artificial intelligence technologies were used in the preparation of this manuscript.

16. Shimizu T., Kato S., Demura S., Shinmura K., Yokogawa N., Kurokawa Y. et al. Characteristics and risk factors of instrumentation failure following total en bloc spondylectomy. *Bone Joint J.* 2023;105-B(2):172-179. doi: 10.1302/0301-620X.105B2.BJJ-2022-0761.R2.
17. Hu J., Song G., Chen H., Xu H., Wang A., Wang X. et al. Surgical outcomes and risk factors for surgical complications after en bloc resection following reconstruction with 3D-printed artificial vertebral body for thoracolumbar tumors. *World J Surg Oncol.* 2023;21(1):385. doi: 10.1186/s12957-023-03271-8.
18. Hu X., Barber S.M., Ji Y., Kou H., Cai W., Cheng M. et al. Implant failure and revision strategies after total spondylectomy for spinal tumors. *J Bone Oncol.* 2023;42:100497. doi: 10.1016/j.jbo.2023.100497.
19. Schwendner M., Ille S., Kirschke J.S., Bernhardt D., Combs S.E., Meyer B. et al. Clinical evaluation of vertebral body replacement of carbon fiber-reinforced polyetheretherketone in patients with tumor manifestation of the thoracic and lumbar spine. *Acta Neurochir (Wien).* 2023;165(4):897-904. doi: 10.1007/s00701-023-05502-z.
20. Li Z., Guo L., Zhang P., Wang J., Wang X., Yao W. A Systematic Review of Perioperative Complications in en Bloc Resection for Spinal Tumors. *Global Spine J.* 2023;13(3):812-822. doi: 10.1177/21925682221120644.
21. Xu H., Wang X., Han Y., Jiang Y., Wang J., Zhang X. et al. Biomechanical comparison of different prosthetic reconstructions in total en bloc spondylectomy: a finite element study. *BMC Musculoskelet Disord.* 2022;23(1):955. doi: 10.1186/s12891-022-05919-0.
22. Heary R.F., Parvathreddy N., Sampath S., Agarwal N. Elastic modulus in the selection of interbody implants. *J Spine Surg.* 2017;3(2):163-167. doi: 10.21037/jss.2017.05.01.
23. Warburton A., Girdler S.J., Mikhail C.M., Ahn A., Cho S.K. Biomaterials in Spinal Implants: A Review. *Neurospine.* 2020;17(1):101-110. doi: 10.14245/ns.1938296.148.
24. Frost H.M. A 2003 update of bone physiology and Wolff's Law for clinicians. *Angle Orthod.* 2004;74(1):3-15. doi: 10.1043/0003-3219(2004)074<0003:AUOBPA>2.0.CO;2.

#### Сведения об авторах

- ✉ Заборовский Никита Сергеевич — канд. мед. наук  
Адрес: Россия, 195427, г. Санкт-Петербург,  
ул. Академика Байкова, д. 8  
<https://orcid.org/0000-0003-4562-8160>  
eLibrary SPIN: 3766-5993  
e-mail: n.zaborovskii@yandex.ru
- Шайлиева Шеридан Ларсеновна  
<https://orcid.org/0009-0005-2113-3077>  
eLibrary SPIN: 8199-7620  
e-mail: sheri21072001@gmail.com
- Масевнин Сергей Владимирович — канд. мед. наук  
<https://orcid.org/0000-0002-9853-7089>  
eLibrary SPIN: 5505-2641  
e-mail: drmasevnin@gmail.com
- Смекалёнков Олег Анатольевич — канд. мед. наук  
<https://orcid.org/0000-0002-4867-0332>  
eLibrary SPIN: 7902-6380  
e-mail: drsmekalenkov@mail.ru
- Мураховский Владислав Сергеевич  
<https://orcid.org/0000-0002-9985-5636>  
eLibrary SPIN: 3819-8485  
e-mail: drmurakhovsky@gmail.com
- Пташников Дмитрий Александрович — д-р мед. наук, профессор  
<https://orcid.org/0000-0001-5765-3158>  
eLibrary SPIN: 7678-6542  
e-mail: drptashnikov@yandex.ru

#### Authors' information

- ✉ Nikita S. Zaborovskii — Cand. Sci. (Med.)  
Address: 8, Akademika Baykova st., St. Petersburg,  
195427, Russia  
<https://orcid.org/0000-0003-4562-8160>  
eLibrary SPIN:3766-5993  
e-mail: n.zaborovskii@yandex.ru
- Sheridan L. Shailieva  
<https://orcid.org/0009-0005-2113-3077>  
eLibrary SPIN: 8199-7620  
e-mail: sheri21072001@gmail.com
- Sergei V. Masevnin — Cand. Sci. (Med.)  
<https://orcid.org/0000-0002-9853-7089>  
eLibrary SPIN:5505-2641  
e-mail: drmasevnin@gmail.com
- Oleg A. Smekalenkov — Cand. Sci. (Med.)  
<https://orcid.org/0000-0002-4867-0332>  
eLibrary SPIN:7902-6380  
e-mail: drsmekalenkov@mail.ru
- Vladislav S. Murakhovsky  
<https://orcid.org/0000-0002-9985-5636>  
eLibrary SPIN:3819-8485  
e-mail: drmurakhovsky@gmail.com
- Dmitrii A. Ptashnikov — Dr. Sci. (Med.), Professor  
<https://orcid.org/0000-0001-5765-3158>  
eLibrary SPIN:7678-6542  
e-mail: drptashnikov@yandex.ru