



ПРИМЕНЕНИЕ ИНТРАОПЕРАЦИОННОЙ КОНУСНО-ЛУЧЕВОЙ ТОМОГРАФИИ И ОПТИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ ПРИ ЗАДНЕЙ ВИНТОВОЙ ФИКСАЦИИ C₁–C₂ ПОЗВОНКОВ: КЛИНИЧЕСКИЙ СЛУЧАЙ И ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Д.А. Беляев¹, М.Н. Кравцов^{1,2,3}, К.В. Тюликов¹, В.А. Мануковский^{1,2}

¹Научно-исследовательский институт скорой помощи им. И.И. Джанелидзе, Санкт-Петербург, Россия;

²Северо-Западный государственный университет им. И.И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия;

³Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия

Цель исследования. Анализ особенностей оперативной техники и оценка эффективности интраоперационной КТ-навигации при задней винтовой фиксации C₁–C₂ позвонков на примере клинического случая и обзора литературы.

Материал и методы. На примере клинического случая представлено подробное описание оперативной техники задней винтовой фиксации C₁–C₂ позвонков под интраоперационной навигацией с использованием мобильного конусно-лучевого томографа. Проведен нарративный обзор литературы.

Результаты. Описанная техника выполнения задней винтовой фиксации C₁–C₂ позвонков обеспечивает точное позиционирование винтов при минимальной лучевой нагрузке на операционную бригаду, что повышает безопасность подобных операций.

Заключение. Для эффективного использования конусно-лучевой томографии и оптической навигации требуются тщательная предоперационная оценка допустимой траектории введения винта на основе КТ и КТ-ангиографии, жесткая фиксация головы на операционном столе, использование официального навигационного оборудования и инструментов, а также предварительное обучение персонала технике операции на симуляционных моделях.

Ключевые слова: верхнешейный отдел позвоночника; интраоперационная навигация; задняя винтовая фиксация; интраоперационная компьютерная томография.

Для цитирования: Беляев Д.А., Кравцов М.Н., Тюликов К.В., Мануковский В.А. Применение интраоперационной конусно-лучевой томографии и оптической навигации при задней винтовой фиксации C₁–C₂ позвонков: клинический случай и обзор литературы // Хирургия позвоночника. 2026. Т. 23, № 2. С. 70–76. DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2026.2.70-76>

USE OF INTRAOPERATIVE CONE BEAM TOMOGRAPHY AND OPTICAL NAVIGATION FOR C1–C2 POSTERIOR SCREW FIXATION: A CLINICAL CASE AND LITERATURE REVIEW

D.A. Belyaev¹, M.N. Kravtsov^{1,2,3}, K.V. Tiulikov¹, V.A. Manukovskiy^{1,2}

¹Research Institute of Emergency Medicine n.a. I.I. Dzhanelidze, St. Petersburg, Russia;

²North-West State Medical University n.a. I.I. Mechnikov, St. Petersburg, Russia;

³S.M. Kirov Military Medical Academy, St. Petersburg, Russia

Objective. To analyze the features of the surgical technique and evaluate the effectiveness of intraoperative CT navigation in posterior screw fixation of the C1–C2 vertebrae using a clinical case as an example and a literature review.

Material and Methods. A clinical case is presented to provide a detailed description of the surgical technique for posterior screw fixation of the C1–C2 vertebrae under intraoperative navigation using a mobile cone beam CT scanner. A narrative review of the literature is also conducted.

Results. The described technique for performing posterior screw fixation of the C1–C2 vertebrae ensures precise positioning of the screws with minimal radiation exposure to the operating team, which increases the safety of such operations.

Conclusion. Effective use of cone beam tomography and optical navigation requires careful preoperative assessment of the acceptable screw insertion trajectory based on CT study and CT angiography, rigid head fixation on the operating table, the use of official navigation equipment and instruments, and preliminary staff training in surgical technique using simulation models.

Key Words: upper cervical spine; intraoperative navigation; posterior screw fixation; intraoperative computed tomography.

Please cite this paper as: Belyaev DA, Kravtsov MN, Tiulikov KV, Manukovskiy VA. Use of intraoperative cone beam tomography and optical navigation for C1–C2 posterior screw fixation: a clinical case and literature review. Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika). 2026;23(2):70–76. In Russian. DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2026.2.70-76>

Краниовертебральный переход характеризуется сложной вариабельной анатомией и значительным диапазоном движения [1–3]. Травма краниовертебрального перехода может приводить к нестабильности с высоким риском повреждения нейроваскулярных структур [1, 2, 4]. Задняя винтовая фиксация верхнешейного отдела позвоночника характеризуется высокой биомеханической стабильностью [5, 6]. Однако, по данным литературы [6, 7], риск повреждения позвоночной артерии при задней винтовой фиксации техникой «свободной руки» достигает 8,2–16,7 %. Различные варианты спинальной навигации используют с целью снижения риска повреждения нейроваскулярных структур. Системы навигации на основе интраоперационной трехмерной флюороскопии и предоперационной КТ характеризуются неточной регистрацией пациента в системе и большой погрешностью из-за высокой мобильности шейного отдела позвоночника и нестабильного характера переломов краниовертебрального перехода [8–11]. Использование интраоперационного конусно-лучевого томографа (O-arm), совмещенного со спинальной навигацией, может повысить точность имплантации. Однако работ, освещающих технику и эффективность использования данного вида навигации при задней винтовой фиксации верхнешейного отдела позвоночника, в отечественной литературе недостаточно [12–15].

Цель исследования – анализ особенностей оперативной техники и оценка эффективности интраоперационной КТ-навигации при задней винтовой фиксации C_1 – C_2 позвонков на примере кинического случая и обзора литературы.

Описание клинического случая

Мужчина Р., 47 лет, впервые обратился за медицинской помощью через 30 сут после получения закрытой травмы шейного отдела позвоночника в результате падения с высоты собственного роста. При поступле-

нии жаловался на боль в шее с иррадиацией в затылочную область, а также на ограничение объема движений в шее. Неврологического дефицита не отмечалось. При КТ шейного отдела позвоночника выявлен перелом зуба C_2 позвонка 2-го типа по Anderson и D'Alonzo [16] без признаков консолидации (рис. 1).

Учитывая нестабильный характер перелома и сроки от момента травмы, приняли решение о задней винтовой фиксации C_1 – C_2 позвонков по методике Goel – Harms [17, 18] с использованием интраоперационной КТ (O-arm) и спинальной навигации.

Планирование операции при использовании КТ-навигации не отличалось от подготовки к стандартной операции под рентгеноскопией. При анализе предоперационной КТ проводили измерение ширины латеральных масс C_1 , высоты задней дуги C_1 , ширины ножек дуги C_2 , высоты перешейка C_2 с двух сторон по описанным ранее методикам [19, 20]. Данные измерения позволили выбрать оптимальный способ имплантации винтов в C_1 и C_2 позвонки.

Техника и ход операции могут варьировать в зависимости от применяемого оборудования. В данном

случае использовали интраоперационный мобильный конусно-лучевой преобразователь O-arm с навигационной станцией.

Положение пациента на операционном столе – на животе с жесткой фиксацией головы. Обработка операционного поля и драпировка не отличались от стандартной методики. После выполнения стандартного срединного доступа референтную рамку фиксировали к скобе (рис. 2). Допускается фиксация рамки к остистому отростку C_2 позвонка [19].

Референтную рамку устанавливали таким образом, чтобы руки хирурга во время операции не закрывали ее от оптической камеры навигационной станции. Первую интраоперационную томографию (O-arm) выполняли для получения трехмерной реконструкции шейного отдела позвоночника и ее прямой регистрации в навигационной станции. Далее регистрировали поинтер и остальной инструментарий, необходимый для установки винтов: высокооборотистый бор, метчик, отвертки и пр. (рис. 3).

Регистрация неофициальных инструментов обеспечивалась прикреплением к ним универсальных трекеров. Точность регистрации проверяли

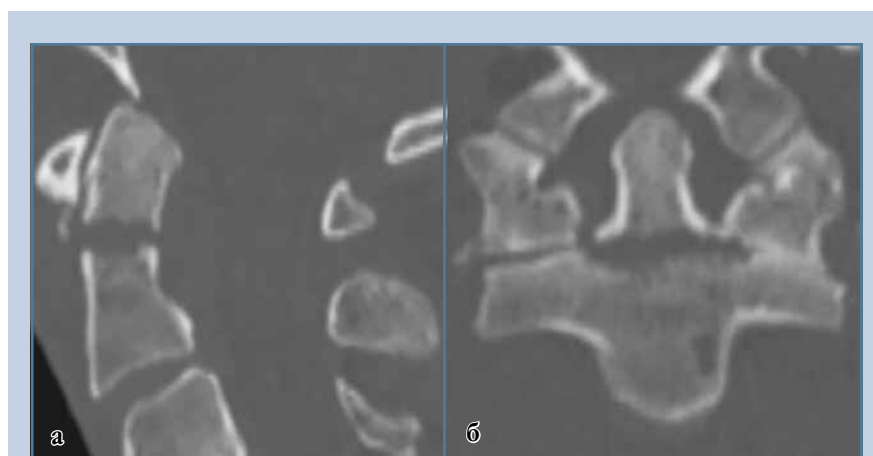


Рис. 1

Предоперационная КТ пострадавшего Р., 47 лет: а – перелом зуба C_2 позвонка 2-го типа по Anderson и D'Alonzo с диастазом отломков 5 мм на сагиттальной реконструкции; б – фронтальная реконструкция КТ



Рис. 2

Положение пациента на операционном столе: **а** – общий вид пациента; **б** – фиксация референтной рамки пациента за скобу



Рис. 3

Интраоперационная КТ и авторегистрация пациента: **а** – положение O-arm и пациента (стрелками обозначены референтная рамка пациента и камера навигационной системы); **б** – регистрация пойнтера

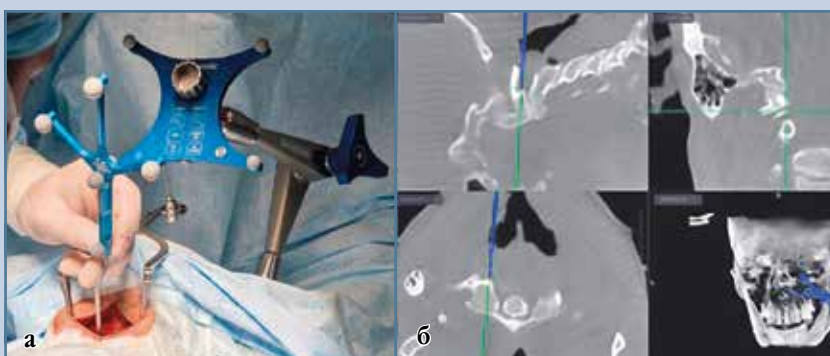


Рис. 4

Оценка точности навигации по анатомическим ориентирам и выбор траектории ввода винта в C₁ позвонок: **а** – вид пойнтера в операционной ране; **б** – положение пойнтера на мониторе навигационной станции

при помощи установки пойнтера на анатомические ориентиры (рис. 4).

После верификации точности регистрации имплантировали винты в C₁ и C₂ позвонки. Точки ввода и траектории введения винтов выбирали под контролем системы навигации. Для повышения точности имплантации винтов в условиях высокой мобильности C₁–C₂, обусловленной как функциональными особенностями верхнешейного отдела, так и травматической нестабильностью, канал винта формировали при помощи навигируемого бора. Винты устанавливали при помощи навигируемой отвертки. Система навигации позволяла определять оптимальные длину и диаметр винтов (рис. 5). Положение имплантированных винтов контролировали повторной КТ O-arm (рис. 6). Операцию завершали стандартно (рис. 7).

Обсуждение

Проблема мальпозиции винтов при задней фиксации шейного отдела позвоночника продолжает оставаться актуальной. Согласно анатомическому исследованию Yoshida et al. [21], рискованными с точки зрения повреждения нейроваскулярных структур были траектории 13,3 % трансартикулярных C₁–C₂ винтов и 9,7 % C₂ транспедикулярных винтов. Траектория была расценена как неприемлемая в 3,2 и 4,0 % винтов соответственно.

В исследовании Neo et al. [22], посвященном определению точности имплантации шейных транспедикулярных винтов методом «свободной руки» при дегенеративной патологии на уровне C₂–C₆ позвонков, в 29 % случаях выявлена мальпозиция. В 84 % случаев мальпозиция была латеральной в сторону отверстия поперечного отростка, 15 % винтов были установлены со значительной мальпозицией (2–3-я степень) [22]. В мультицентровом исследовании А.В. Губина и соавт. [23] проводилась оценка точности установки винтов и частоты осложнений при задней винтовой фиксации методом «свободной руки» на уровне C₁,

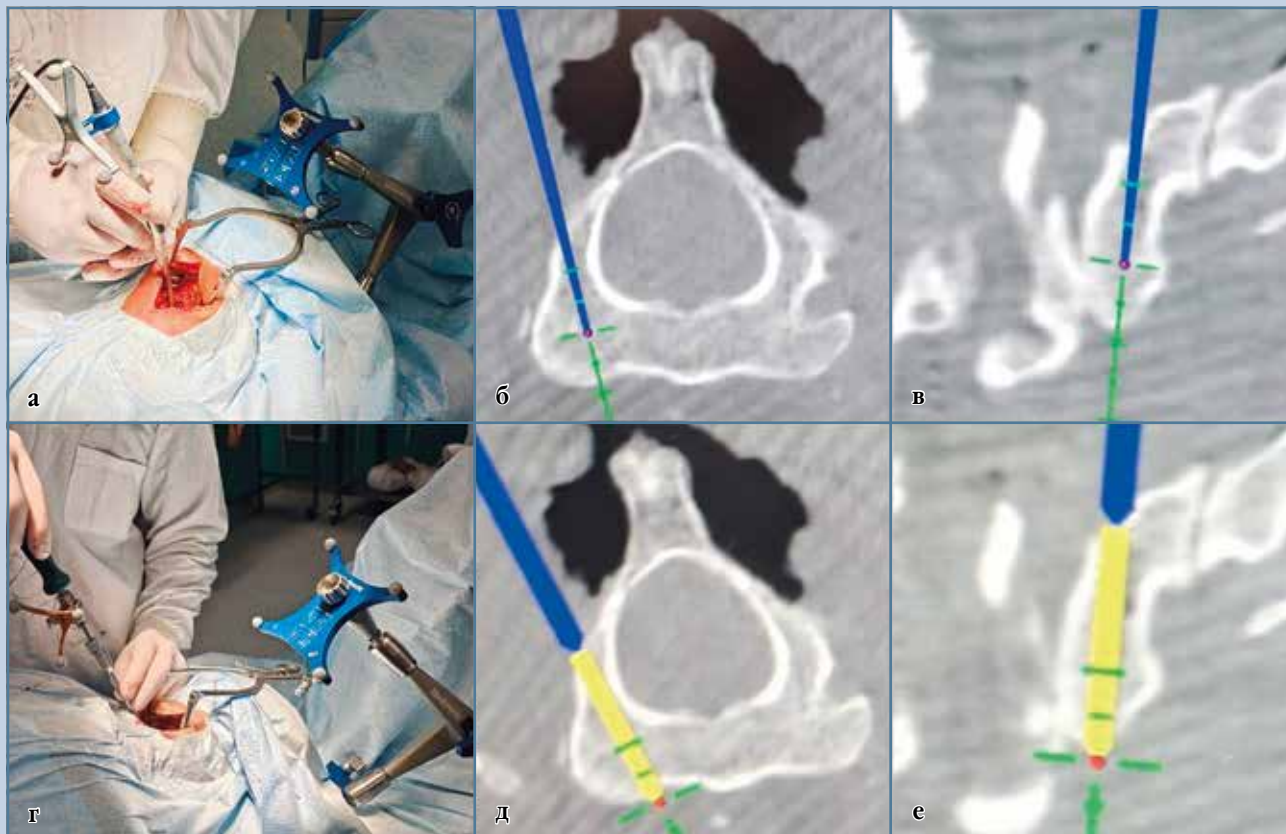


Рис. 5

Этап имплантации винтов: **а** – навигируемый бор в руках хирурга; **б, в** – проведение бора под контролем навигации в аксиальной и сагитальной проекциях; **г** – навигируемая отвертка в руках хирурга; **д, е** – проведение винта под контролем навигации (те же проекции КТ)



Рис. 6

Интраоперационная КТ на экране станции O-arm: **а, б** – корректное положение винтов в C₁ и C₂ в аксиальной плоскости; **в, г** – правая и левая группы винтов на сагитальной реконструкции; **д** – репозиция зуба C₂

C₂. При общем количестве пациентов 41 частота мальпозиции на уровне C₁ составила 37,0 %, на уровне C₂ – 40,5 %. В вышеперечисленных работах не отмечено повреждения нейроваскулярных структур.

Максимальная частота повреждения позвоночной артерии достигала в отдельных сериях 16,7 % при трансартикулярной C₁–C₂ фиксации и 9,1 % при C₁–C₂ фиксации при помощи винтов и стержней [24–26].

Lee et al. [7] исследовали частоту повреждения позвоночной артерии при различных операциях на шейном отделе позвоночника. В мультицентровое исследование включены 512 случаев задней винтовой C₁–C₂

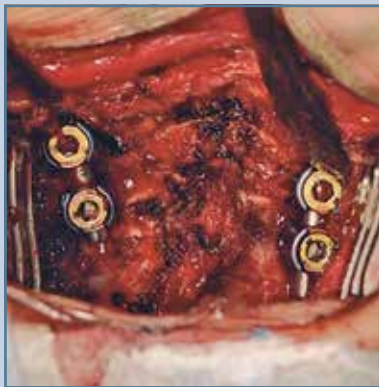


Рис. 7
Вид операционной раны после фиксации стержней

фиксации методом «свободной руки» под флюороскопией. Повреждения зарегистрированы при задней C_1 – C_2 фиксации по Goel – Harms и составили 1,35 % (4 случая на уровне C_1 , 3 – на уровне C_2). Все повреждения позвоночной артерии на уровнях C_1 и C_2 возникли за счет мальпозиции инструментария на этапах формирования канала для винта высокооборотистым бором, исследования канала для винта щупом, проведения винта в латеральные массы C_1 позвонка и транспедикулярно в C_2 . Из семи случаев повреждений позвоночных артерий на уровне C_1 – C_2 острое нарушение мозгового кровообращения верифицировано у одного пациента [7]. Таким образом, задняя винтовая фиксация C_1 – C_2 позвонков методом «свободной руки» сопряжена с риском развития жизнеугрожающих осложнений, связанных с мальпозицией винтов вследствие недооценки aberrантной анатомии позвоночной артерии и посттравматической атлантоаксиальной дислокации.

Применение оптической интраоперационной КТ-навигации при задней винтовой фиксации C_1 – C_2 позвонков в современной литературе представлено лишь небольшими сериями наблюдений, что, по всей вероятности, обусловлено сложной хирургической анатомией C_1 и C_2 позвонков и высокой

мобильностью верхнешейного отдела, затрудняющих применение навигации и повышающих риск осложнений. Czabanka et al. [19] использовали данный метод навигации при задней фиксации C_1 – C_2 по Goel – Harms у 12 пациентов. Мальпозиция отмечена в одном случае. Harel et al. [27] использовали оптическую навигацию с применением интраоперационной КТ в пяти случаях C_1 – C_2 фиксации по Goel – Harms. На уровне C_1 мальпозиция выявлена дважды. В одном случае потребовалась ревизия с целью переустановки винта. На уровне C_2 некорректно были установлены два винта. В обоих случаях отмечалась девиация винта за пределы ножки дуги C_2 на величину менее 2 мм. В серии Carl et al. [28] у девяти пострадавших была выполнена задняя C_1 – C_2 винтовая фиксация (по Goel – Harms 32 винта, по Mager 1 – 2) с применением оптической интраоперационной КТ-навигации. Частота мальпозиции составила 2,9 %. Медиальная мальпозиция C_1 одного винта была выявлена при интраоперационной КТ и потребовала переустановки.

Инструментальное оборудование и оперативная техника в вышеприведенных работах отличались от методики, продемонстрированной в нашем примере. В работах Czabanka et al. и Carl et al. [19, 28] был использован конусно-лучевой томограф AIRO, а фиксация референтной рамки осуществлялась за остистые отростки C_2 – C_3 позвонков. Этот прием фиксации рамки не является надежным и несет потенциальный риск погрешности навигации, особенно при травматическом повреждении задних структур позвонков, в частности при «переломе палача». Кроме того, референтная рамка затрудняет визуализацию операционного поля. Carl et al. [28] фиксировали голову пациента в специальной маске, что также не исключает смещения головы и шеи во время операции. В способе имплантации Czabanka et al. [19] применялись канюлированные винты, редко используемые в хирургии верхнешейного отдела. В работе Harel et al. [27],

как и в приведенном нами клиническом примере, были использованы навигация StealthStation S8 и конусно-лучевой томограф O-arm. Однако Harel et al. не акцентировали внимания на технических нюансах использования навигационного оборудования. В частности, не указаны способ фиксации головы пациента и место крепления референтной рамки, что, по нашему мнению, имеет принципиальное значение при работе с навигируемыми инструментами и имплантации винтов.

Из представленных выше работ следует, что применение интраоперационной КТ-навигации минимизирует, но полностью не исключает риска мальпозиции винтов, вероятно, вследствие значительной мобильности верхнешейного отдела позвоночника, нестабильного характера повреждений, небольших размеров костных анатомических структур C_1 и C_2 позвонков. Однако, как продемонстрировано в нашем наблюдении, применение жесткой фиксации головы и высокооборотистого навигируемого бора делает более точным интраоперационный контроль траектории имплантируемого винта.

Длительность операции при использовании КТ-навигации является важным фактором при внедрении этой технологии в клиническую практику. В ряде исследований приведены противоречивые данные о влиянии применения O-arm-навигации на время операции [27–29]. Первоначальное увеличение времени операции может быть объяснено кривой обучаемости. Рутинное применение системы навигации уменьшает затрачиваемое на нее время. С другой стороны, применение оптической навигации и мобильной интраоперационной КТ может снизить необходимость переустановки винтов в ходе вмешательства и выполнения повторных операций.

Низкая лучевая нагрузка на членов операционной бригады – одно из преимуществ КТ-навигации [30]. Хирург покидает операционный зал при проведении интраоперационной КТ. Флюороскопию целесообразно использовать только на этапе пози-

ционирования пациента и репозиции позвонков. Bratschitsch et al. [30] считают, что интраоперационная КТ-навигация позволяет спинальному хирургу выполнять в десять раз больше операций в год до достижения максимально допустимой эффективной дозы облучения.

Ограничение исследования. Ограничения связаны с низким уровнем доказательности несистематического обзора литературы и отсутствием проспективной серии наблюдений.

Заклучение

По данным нарративного обзора литературы, оптическая интраоперационная КТ-навигация обеспечивает более точное позиционирование винтов при задней фиксации C₁–C₂ позвонков в сравнении с методом «свободной руки». Данная методика в сравнении со стандартной техникой под рентгеноскопическим наведением может иметь преимущества также в уменьшении времени операции, снижении

лучевой нагрузки на хирургическую бригаду. Однако для эффективного использования О-агм-навигации требуются тщательная предоперационная оценка допустимой траектории введения винта на основе КТ и КТ-ангиографии, жесткая фиксация головы пациента на операционном столе, использование официального навигационного оборудования и инструментов, а также предварительное обучение персонала технике операции на симуляционных моделях.

Литература/References

1. Mead LB, Millhouse PW, Krystal J, Vaccaro AR. C1 fractures: a review of diagnoses, management options, and outcomes. *Curr Rev Musculoskel Med*. 2016;9:255–262. DOI: 10.1007/s12178-016-9356-5
2. Allia J, Darmante H, Barres L, Peretti F, Trojani C, Bronsard N. Early mortality and morbidity of odontoid fractures after 70 years of age. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2020;106:1399–1403. DOI: 10.1016/j.otsr.2019.12.017
3. Lopez AJ, Scheer JK, Leibl KE, Smith ZA, Dlouhy BJ, Dahdaleh NS. Anatomy and biomechanics of the craniocervical junction. *Neurosurg Focus*. 2015;38:E2. DOI: 10.3171/2015.1.FOCUS14807
4. Kim SK, Ko JH, Park JB, Seo HY, Chang DG, Chang K. Proposal of new radiological classification and treatment strategy for transverse fractures of the C2 axis body. *Orthop Surg*. 2021;13:1378–1388. DOI: 10.1111/os.13013
5. Huang DG, Hao DJ, He BR, Wu QN, Liu TJ, Wang XD, Guo H, Fang XY. Posterior atlantoaxial fixation: a review of all techniques. *Spine J*. 2015;15:2271–2281. DOI: 10.1016/j.spinee.2015.07.008
6. Chen Q, Brahimaj BC, Khanna R, Kerolus MG, Tan LA, David BT, Fessler RG. Posterior atlantoaxial fusion: a comprehensive review of surgical techniques and relevant vascular anomalies. *J Spine Surg*. 2020;6:164–180. DOI: 10.21037/jss.2020.03.05
7. Lee CH, Hong JT, Kang DH, Kim KJ, Kim SW, Kim YJ, Kim SW, Kim SW, Kim YJ, Chung CK, Shin JJ, Oh JK, Yi S, Lee JK, Lee JH, Lee HJ, Chun HJ, Cho DC, Jin YJ, Choi KC, Han IH, Hyun SJ, Hur JW, Song GS. Epidemiology of iatrogenic vertebral artery injury in cervical spine surgery: 21 multicenter studies. *World Neurosurg*. 2019;126:e1050–e1054. DOI: 10.1016/j.wneu.2019.03.042
8. Bredow J, Oppermann J, Kraus B, Schiller P, Schiffer G, Sobottke R, Eysel P, Koy T. The accuracy of 3D fluoroscopy-navigated screw insertion in the upper and subaxial cervical spine. *Eur Spine J*. 2015;24:2967–2976. DOI: 10.1007/s00586-015-3974-2
9. Engler JA, Smith ML. Use of intraoperative fluoroscopy for the safe placement of C2 laminar screws: technical note. *Eur Spine J*. 2015;24:2771–2775. DOI: 10.1007/s00586-015-4165-x
10. Lange N, Meyer B, Meyer HS. Navigation for surgical treatment of disorders of the cervical spine - A systematic review. *J Orthop Surg (Hong Kong)*. 2021;29(1_suppl): 23094990211012865. DOI: 10.1177/23094990211012865
11. Tauchi R, Imagama S, Sakai Y, Ito Z, Ando K, Muramoto A, Matsui H, Matsumoto T, Ishiguro N. The correlation between cervical range of motion and misplacement of cervical pedicle screws during cervical posterior spinal fixation surgery using a CT-based navigation system. *Eur Spine J*. 2013;22:1504–1508. DOI: 10.1007/s00586-013-2719-3
12. Коновалов Н.А., Назаренко А.Г., Асютин Д.С., Оноприенко Р.А., Королишин В.А., Черкиев И.У., Мартынова М.А., Закиров Б.А., Тимонин С.Ю., Косырькова А.В. Применение интраоперационных средств нейровизуализации и системы навигации в хирургическом лечении первичных и метастатических опухолей позвоночника. *Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко*. 2016;80(2):5–14. [Konovalov NA, Nazarenko AG, Asyutin DS, Onopriyenko RA, Korolishin VA, Cherkiyev IU, Martynova MA, Zakirov BA, Timonin SYU, Kosyr'kova AV. Use of intraoperative neuroimaging tools and navigation systems in surgical treatment of primary and metastatic spinal tumors. *Burdenko's Journal of Neurosurgery*. 2016;80(2):5–14]. DOI: 10.17116/neiro20168025-14 EDN: VSARLR
13. Суфьянов А.А., Манащук В.И., Набиев Д.Н., Шапкин А.Г., Зайцев М.К., Телблов Г.Э., Халь Захрани А.А., Талыбов Р.С., Абриль Арнас Х.Л. Хирургическое лечение пациентов с первичными и метастатическими опухолями позвоночника с использованием мобильного интраоперационного компьютерного томографа О-Агм. *Нейрохирургия*. 2019;21(4):39–49. [Sufyanov AA, Manashchuk VI, Nabyev DN, Shapkin AG, Zaytsev MK, Tebloyev GE, KH Al' Zakhрани AA, Talybov RS, Abril' Arenas KHL. Surgical treatment of patients with primary and metastatic spinal tumors using the mobile intraoperative computed tomography scanner O-Arm. *Nejrobirurgiâ*. 2019;21(4):39–49]. DOI: 10.17650/1683-3295-2019-21-4-39-49 EDN: KQOXZJ
14. Кокушин Д.Н., Виссарионов С.В., Сяндюков А.Р., Хусанов Н.О., Корняков П.Н., Соколова В.В. Хирургическая коррекция спондилолистеза L₅ позвонка у ребенка с использованием 3D-КТ навигации. *Научное обозрение. Медицинские науки*. 2022;6:59–64. [Kokushin DN, Vissarionov SV, Syundyukov AR, Khusainov NO, Korniyakov PN, Sokolova VV. Surgical correction of spondylolisthesis of the L5 vertebra in a child using 3D-CT navigation. *Scientific review. Medical sciences*. 2022;6:59–64]. DOI: 10.17513/srms.1304 EDN: VQLIKQ
15. Пимбурский И.П., Домрачев И.Е., Челпаченко О.Б., Колесов С.В., Жердев К.В., Яцк С.П., Бутенко А.С., Казьмин А.И. Снижение имплант-ассоциированных осложнений в хирургии сколиоза путем применения О-агм-навигации и аддитивных технологий. *Вестник Российской академии медицинских наук*. 2025;80(2):146–154. [Pimburskiy IP, Domrachev IE, Chelpachenko OB, Kolesov SV, Zherdev KV, Yatsyk SP, Butenko AS, Kaz min AI. Reducing implant-associated complications in scoliosis surgery using O-arm navigation and additive technologies. *Annals of the Russian Academy of Medical Sciences*. 2025;80(2):146–154]. DOI: 10.15690/vramn18039 EDN: KIGXJZ
16. Anderson LD, D'Alonzo RT. Fractures of the odontoid process of the axis. *J Bone Joint Surg Am*. 1974;56:1663–1674.

17. **Goel A, Laheri V.** Plate and screw fixation for atlanto-axial subluxation. *Acta Neurochir (Wien)*. 1994;129:47–53. DOI: 10.1007/bf01400872
18. **Harms J, Melcher RP.** Posterior C1–C2 fusion with polyaxial screw and rod fixation. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2001;26:2467–2471. DOI: 10.1097/00007632-200111150-00014
19. **Czabanka M, Haemmerli J, Hecht N, Fochre B, Arden K, Liebig T, Woitzik J, Vajkoczy P.** Spinal navigation for posterior instrumentation of C1–2 instability using a mobile intraoperative CT scanner. *J Neurosurg Spine*. 2017;27:268–275. DOI: 10.3171/2017.1.SPINE16859
20. **Klepinowski T, Żyłka N, Pettersson S, Hanaya J, Pala B, Łątka K, Tattera D, Poncyłjusz W, Ogilvy C, Sagan L.** Types of high-riding vertebral artery: a classification system for preoperative planning of C2 instrumentation based on 908 potential screw insertion sites. *Spine J*. 2025;25:59–68. DOI: 10.1016/j.spinee.2024.08.021
21. **Yoshida M, Neo M, Fujibayashi S, Nakamura T.** Comparison of the anatomical risk for vertebral artery injury associated with the C2-pedicle screw and atlantoaxial transarticular screw. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2006;31:E513–17. DOI: 10.1097/01.brs.0000224516.29747.52
22. **Neo M, Sakamoto T, Fujibayashi S, Nakamura T.** The clinical risk of vertebral artery injury from cervical pedicle screws inserted in degenerative vertebrae. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2005;30:2800–2805. DOI: 10.1097/01.brs.0000192297.07709.5d
23. **Губин А.В., Бурцев А.В., Рябых С.О., Климов В.С., Евсюков А.В., Ивлиев Д.С.** Анализ винтовой фиксации C₁, C₂ при атлантоаксиальной нестабильности у пациентов разных возрастных групп. *Хирургия позвоночника*. 2018;15(3):6–12. [Gubin AV, Burtsev AV, Ryabykh SO, Klimov VS, Yevsyukov AV, Ivliyev DS. Analysis of C1, C2 screw fixation for atlantoaxial instability in patients of different age groups. *Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonocznika)*. 2018;15(3):6–12]. DOI: 10.14531/ss2018.3.6-12 EDN: UZBQHW
24. **Elliott RE, Tanweer O, Boah A, Morsi A, Ma T, Frempong-Boadu A, Smith ML.** Outcome comparison of atlantoaxial fusion with transarticular screws and screw-rod constructs: meta-analysis and review of literature. *J Spinal Disord Tech*. 2014;27:11–28. DOI: 10.1097/BSD.0b013e318277da19
25. **Lee JH, Jahng TA, Chung CK.** C1-2 transarticular screw fixation in high-riding vertebral artery: suggestion of new trajectory. *J Spinal Disord Tech*. 2007;20:499–504. DOI: 10.1097/BSD.0b013e318031af51
26. **Tan J, Li L, Sun G, Qian L, Yang M, Zeng C, Teng H, Jia L.** C1 lateral mass-C2 pedicle screws and crosslink compression fixation for unstable atlas fracture. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2009;34:2505–2509. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181b4009a
27. **Harel R, Nulman M, Knoller N.** Intraoperative imaging and navigation for C1–C2 posterior fusion. *Surg Neurol Int*. 2019;10:149. DOI: 10.25259/SNI_340_2019
28. **Carl B, Bopp M, Pojskic M, Voellger B, Nimsky C.** Standard navigation versus intraoperative computed tomography navigation in upper cervical spine trauma. *Int J Comput Assist Radiol Surg*. 2019;14:169–182. DOI: 10.1007/s11548-018-1853-0
29. **Smith JD, Jack MM, Harn NR, Bertsch JR, Arnold PM.** Screw placement accuracy and outcomes following O-arm-navigated atlantoaxial fusion: a feasibility study. *Global Spine J*. 2016;6:344–349. DOI: 10.1055/s-0035-1563723
30. **Bratschitsch G, Leitner I, Stücklschweiger G, Guss H, Sadoghi P, Puchwein P, Leithner A, Radl R.** Radiation exposure of patient and operating room personnel by fluoroscopy and navigation during spinal surgery. *Sci Rep*. 2019;9:17652. DOI: 10.1038/s41598-019-53472-z

Статья поступила в редакцию 26.12.2025

Рецензирование пройдено 06.05.2026

Подписано в печать 05.06.2026

Received 26.12.2025

Review completed 06.05.2026

Passed for printing 05.06.2026

Дополнительная информация

Вклад авторов. Д.А. Беляев – сбор материала, составление черновика рукописи, литературный обзор, анализ полученных данных; М.Н. Кравцов – разработка концепции работы, разработка дизайна работы, редактирование; К.В. Тюликов – разработка концепции работы, интерпретация полученных данных; В.А. Мануковский – проверка принципиально важного интеллектуального содержания, окончательное утверждение рукописи. 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.

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Согласие на публикацию. Объем публикуемых конфиденциальных сведений согласован с пациентом.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах

Дмитрий Алексеевич Беляев; eLibrary SPIN: 6874-7887; ORCID: 0009-0003-3043-4870; dimanesth@yandex.ru

✉ Максим Николаевич Кравцов, д-р мед. наук, доцент; Россия, 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, 6; eLibrary SPIN: 2742-6397; ORCID: 0000-0003-2486-6995; neuromax@mail.ru

Константин Владимирович Тюликов, канд. мед. наук; eLibrary SPIN: 6047-9941; ORCID: 0000-0002-4700-889X; tyulik-off@mail.ru

Вадим Анатольевич Мануковский, д-р мед. наук, профессор; eLibrary SPIN: 4323-4555; ORCID: 0000-0003-0319-814X; sekr@emergency.spb.ru

Authors' Info

Dmitriy Alekseevich Belyaev; eLibrary SPIN: 6874-7887; ORCID: 0009-0003-3043-4870; dimanesth@yandex.ru

✉ Maksim Nikolaevich Kravtsov, MD, Dr. Sci. (Medicine), Associate Professor; 6 Akademika Lebedeva str., Saint Petersburg, 194044, Russia; eLibrary SPIN: 2742-6397; ORCID: 0000-0003-2486-6995; neuromax@mail.ru

Konstantin Vladimirovich Tyulikov, MD, Cand. Sci. (Medicine); eLibrary SPIN: 6047-9941; ORCID: 0000-0002-4700-889X; tyulik-off@mail.ru

Vadim Anatolyevich Manukovskiy, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor; eLibrary SPIN: 4323-4555; ORCID: 0000-0003-0319-814X; sekr@emergency.spb.ru