

АУГМЕНТАЦИЯ ТРАСПЕДИКУЛЯРНЫХ ВИНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОСТНОЙ ПЛАСТИКИ У ПАЦИЕНТОВ С ОСТЕОПОРОЗОМ ПОЗВОНОЧНИКА

DOI: 10.17691/stm2021.13.5.01

УДК 616.71–007.234–089.844

Поступила 1.03.2021 г.



А.Е. Боков, к.м.н., зав. отделением онкологии и нейрохирургии
Института травматологии и ортопедии¹;

А.А. Булкин, врач-нейрохирург отделения онкологии и нейрохирургии
Института травматологии и ортопедии¹;

И.С. Братцев, врач-нейрохирург отделения онкологии и нейрохирургии
Института травматологии и ортопедии¹;

С.Я. Калинина, врач-нейрохирург отделения онкологии и нейрохирургии
Института травматологии и ортопедии¹;

С.Г. Млявых, к.м.н., руководитель Института травматологии и ортопедии¹;

D.G. Anderson, MD, Professor, Departments of Orthopaedic and Neurological Surgery;
Clinical Director of the Spine Section, Orthopaedic Research Laboratory²

¹Приволжский исследовательский медицинский университет, пл. Минина и Пожарского, 10/1,
Н. Новгород, 603005;

²Thomas Jefferson University, 130 S., 9th St., Philadelphia, PA, 19107, USA

Цель исследования — разработка нового способа аугментации позвонков на основе применения аутологичной и аллогенной костной крошки при транспедикулярной фиксации и оценка его эффективности в сравнении с техникой на основе полиметилметакрилата (ПММА).

Материалы и методы. В проспективное нерандомизированное исследование включено 164 пациента с дегенеративной патологией поясничного отдела позвоночника или травматическими повреждениями поясничного отдела позвоночника и переходной грудопоясничной области, результаты в течение 18 мес прослежены у 153 пациентов. Радиоденсивность губчатой костной ткани по шкале Хаунсфилда была ниже 110 HU. Пациентам с дегенеративной патологией позвоночника выполнялась транспедикулярная фиксация с трансфораминальным межтеловым спондилодезом, пациентам с травматическими повреждениями позвоночника — промежуточная транспедикулярная фиксация, а при потере высоты тела позвонка более чем на 50% — передний спондилодез.

Пациенты были разделены на три группы: в 1-й группе (n=39) выполнена аугментация костной ткани с применением ПММА; во 2-й группе (n=21) — с применением костной крошки; в 3-й (n=93) аугментация не выполнялась. Срок наблюдения составил 12 мес, регистрировались случаи с поломкой или расшатыванием фиксатора.

Результаты. После аугментации с применением ПММА выявлено 11 случаев (28,2%) дестабилизации фиксатора, при использовании костной крошки нестабильность фиксатора развилась у 2 пациентов (9,5%), без выполнения аугментации осложнения наблюдались у 43 человек (46,2%). При аугментации ПММА не отмечено значимого снижения частоты дестабилизации фиксатора (p=0,0801), в то время как использование костной крошки привело к статистически значимому снижению частоты осложнения (p=0,0023). Результаты логистического регрессионного анализа подтвердили связь снижения частоты дестабилизации фиксатора с разработанной методикой.

Заключение. Применение костной крошки при аугментации позвонков обеспечивает статистически значимое снижение частоты дестабилизации транспедикулярного фиксатора. За счет уменьшения риска проксимального расшатывания и устранения риска дренирования костного цемента в позвоночный канал и сосудистое русло предложенный способ наиболее эффективен у пациентов с нарушением плотности костной ткани.

Для контактов: Боков Андрей Евгеньевич, e-mail: andrei_bokov@mail.ru

Ключевые слова: транспедикулярная фиксация; нестабильность транспедикулярной фиксации; аугментация позвонков; костный цемент; нарушение костной плотности; полиметилметакрилат.

Как цитировать: Bokov A.E., Bulkin A.A., Bratsev I.S., Kalinina S.Ya., Mlyavykh S.G., Anderson D.G. Augmentation of pedicle screws using bone grafting in patients with spinal osteoporosis. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2021; 13(5): 6–12, <https://doi.org/10.17691/stm2021.13.5.01>

English

Augmentation of Pedicle Screws Using Bone Grafting in Patients with Spinal Osteoporosis

A.E. Bokov, MD, PhD, Head of the Department of Oncology and Neurosurgery, Institute of Traumatology and Orthopedics¹;

A.A. Bulkin, Staff Neurosurgeon, Department of Oncology and Neurosurgery, Institute of Traumatology and Orthopedics¹;

I.S. Bratsev, Staff Neurosurgeon, Department of Oncology and Neurosurgery, Institute of Traumatology and Orthopedics¹;

S.Ya. Kalinina, Staff Neurosurgeon, Department of Oncology and Neurosurgery, Institute of Traumatology and Orthopedics¹;

S.G. Mlyavykh, MD, PhD, Director of the Institute of Traumatology and Orthopedics¹;

D.G. Anderson, MD, Professor, Departments of Orthopaedic and Neurological Surgery; Clinical Director of the Spine Section, Orthopaedic Research Laboratory²

¹Privolzhsky Research Medical University, 10/1 Minin and Pozharsky Square, Nizhny Novgorod, 603005, Russia;

²Thomas Jefferson University, 130 S., 9th St., Philadelphia, PA, 19107, USA

The aim of the study was to develop a new method of vertebral augmentation based on autologous and allogeneic bone chips to be used in pedicle screw fixation and to compare this method with the technique based on polymethyl methacrylate (PMMA).

Materials and Methods. This prospective non-randomized study included 164 patients with degenerative pathologies or traumatic injuries of the lumbar spine and transitional thoracolumbar segments; 153 of the operated patients were followed up for 18 months. In these patients, radiodensity of the cancellous bone tissue was below 110 HU by the Hounsfield scale. Patients with degenerative spinal disorders underwent pedicle screw fixation using transforaminal interbody fusion; patients with traumatic spinal injuries underwent intermediate pedicle screw fixation, and those with a loss of vertebral body height by >50% underwent anterior fusion.

The patients were divided into three groups: in group 1 (n=39), bone tissue augmentation was performed using PMMA; in group 2 (n=21), augmentation was done with bone chips; in group 3 (n=93), no augmentation was performed (control group). The follow-up period was 12 months; cases with fixator breakage or loosening were recorded.

Results. After augmentation with PMMA, 11 cases (28.2%) of fixator destabilization were detected. With bone chips, fixator instability developed in 2 patients (9.5%) only, whereas in patients operated without augmentation, the instability was observed in 43 cases (46.2%). With PMMA augmentation, the incidence rate of fixator destabilization did not significantly differ from that in the control group (p=0.0801), while the use of bone chips resulted in a statistically significant decrease of this index compared to the control group (p=0.0023). A logistic regression analysis confirmed the superiority of the developed method over the PMMA-based vertebral augmentation.

Conclusion. The use of bone chips for vertebral augmentation provides a statistically significant decrease in the incidence of pedicle screw fixator destabilization in the post-operative period. By reducing the risk of proximal loosening and eliminating the risk of bone cement drainage into the spinal canal and vascular bed, the proposed method may become especially effective in patients with impaired bone density.

Key words: pedicle screw fixation; pedicle screw instability; vertebral augmentation; bone cement; low bone density; polymethyl methacrylate.

Введение

В настоящее время в мире отмечается увеличение частоты дегенеративных заболеваний и высокоэнергетических травм позвоночника [1, 2]. Дегенеративный стеноз позвоночного канала с нестабильностью сегментов и нестабильная травма позвоночника

являются наиболее частыми показаниями к проведению стабилизирующих вмешательств с применением транспедикулярной фиксации и различных видов спондилодеза, которые служат единственным способом, позволяющим достичь клинически значимого результата.

Одним из наиболее частых осложнений ригидной

фиксации позвоночника является дестабилизация транспедикулярного инструментария. Она встречается в 4–20% случаев и может превышать 50% у пациентов с нарушением плотности костной ткани [3–5]. С целью увеличения стабильности транспедикулярной фиксации разработаны способы с применением аугментации костной ткани костным цементом на основе кальция фосфата и полиметилметакрилата (ПММА) [6]. По данным биомеханических исследований, аугментация с применением ПММА обеспечивает наибольшую прочность фиксации, но этот метод имеет и существенные недостатки, обусловленные необходимостью использовать жидкий цемент [6]. Среди потенциальных осложнений описаны дренирование его в позвоночный канал с компрессией корешков и спинного мозга и в сосудистое русло с развитием легочной эмболии. Также описан синдром имплантации цемента, который может привести к острой сердечной недостаточности вплоть до внезапной смерти в раннем послеоперационном периоде [7–9]. Недостатки широко используемого метода аугментации с использованием ПММА обуславливают разработку новых способов увеличения прочности транспедикулярной фиксации без необходимости применения костного цемента.

Целью исследования явилась разработка нового способа аугментации позвонков на основе использования аутологичной и аллогенной костной крошки при транспедикулярной фиксации и оценка его эффективности в сравнении с техникой на основе полиметилметакрилата.

Материалы и методы

Результаты применения технологии аугментации костной ткани изучены в ходе продольного проспективного нерандомизированного исследования, в которое включены 164 пациента с дегенеративной патологией позвоночника и нестабильными травматическими повреждениями (65 мужчин, 99 женщин; средний возраст — 65,2 (31,0–82,0) года, результаты в течение 18 мес прослежены у 153 пациентов (93,3%).

Данное исследование проведено в соответствии с положениями Хельсинкской декларации (2013) и одобрено Этическим комитетом Приволжского исследовательского медицинского университета (Н.Новгород). От каждого пациента получено информированное согласие.

При предоперационном обследовании у пациентов выявлены признаки остеопороза позвоночника, основанием диагноза служила радиоденсивность губчатой костной ткани позвонка менее 110 HU по шкале Хаунсфилда.

Критерии включения в исследование:

пациенты с травматическими повреждениями поясничного отдела позвоночника и груднопоясничного перехода типа А3, А4, В2, С по классификации AOSpine на фоне остеопороза и со степенью выраженности

неврологической симптоматики по шкале ASIA (группы C, D, E);

пациенты с дегенеративным стенозом позвоночника на фоне клинически значимой нестабильности сегмента, если интенсивность боли в пояснице и нижних конечностях превышала 40 (по шкале 0–100), а индекс ограничения жизнедеятельности по опроснику Освестри — 40%. Рентгенологическим критерием нестабильности сегмента служили трансляция в сагиттальной плоскости более 3 мм, ротация более 10 град [10].

Критерии исключения:

пациенты со спондилолистезом III, IV степени;
пациенты с дегенеративной деформацией, с нарушением сагиттального баланса (SVA >5 см, PI–LL >10), которым требовалась позвоночно-тазовая фиксация или протяженная фиксация более 5 сегментов;
пациенты с признаками нарушения техники транспедикулярной фиксации и аугментации костной ткани;
пациенты с конкурирующей патологией — с новообразованиями позвоночника и воспалительными заболеваниями позвоночника.

Предоперационное обследование пациентов включало оценку неврологического статуса, оценку интенсивности боли по визуально-аналоговой шкале (ВАШ), у пациентов с дегенеративной патологией позвоночника — оценку индекса ограничения жизнедеятельности по опроснику Освестри. Перед операцией всем пациентам была выполнена КТ поясничного отдела, во время исследования определялась радиоденсивность губчатой костной ткани на стандартном уровне L₂ или L₃. У пациентов с травматической патологией измерение проводилось на неповрежденном позвонке.

Пациентов, результаты у которых были прослежены в течение 18 мес (n=153), разделили на три группы:

1-я группа (n=39, 16 мужчин и 23 женщины; средний возраст — 61 (31–79) год) — пациенты, которым применялась транспедикулярная фиксация с аугментацией костной ткани цементом на основе ПММА. В 6 случаях (15,4%) наблюдалась дегенеративная патология, в 33 случаях (84,6%) — травматические повреждения;

2-я группа (n=21, 7 мужчин, 14 женщин; средний возраст — 63 (39–78) года) — пациенты, которым выполнена транспедикулярная фиксация с использованием разработанной технологии аугментации тел позвонков ауто- или аллокостью. С дегенеративной патологией было 5 человек (23,8%), с травматической — 16 (76,2%);

3-я группа (n=93, 38 мужчин, 55 женщин; средний возраст — 58 (42–81) лет) — пациенты, которым выполнена транспедикулярная фиксация без аугментации костной ткани. С дегенеративной патологией было 23 человека (24,7%), с травматической патологией — 70 (75,3%).

Всем пациентам с травматическими повреждениями позвоночника проводили транспедикулярную фиксацию с применением промежуточной фиксации, при

снижении высоты тела позвонка более чем на 50% выполняли передний межтеловой спондилодез, при наличии неврологической симптоматики — декомпрессию из вентрального или дорсального доступа, при передней локализации субстрата — переднюю декомпрессию с применением реконструкции передней колонны. Пациентам с дегенеративным стенозом позвоночного канала во всех случаях выполняли микрохирургическую декомпрессию корешков и трансфораминальный межтеловой спондилодез.

При выполнении аугментации костной ткани с применением ПММА использовали вертебропластическую технику. В этом случае после идентификации ножек позвонков транспедикулярно в тела позвонка вводили иглы для вертебропластики, проводили до середины тела позвонка в сагиттальной проекции. После этого в тела позвонков на каждом уровне с каждой стороны вводили по 2 мл костного цемента на основе ПММА, после чего устанавливали транспедикулярные винты и монтировали фиксирующую систему.

При применении разработанной технологии аугментации костной ткани — использование костной крошки — до введения винтов с двух сторон на каждом уровне в тела позвонков устанавливались костные воронки, через которые импактировалась крошка из аллокости или аутокости с созданием гиперденной области на траектории введения винтов, после чего костная крошка импактировалась в ножки позвонков. Затем транспедикулярно в тела позвонков устанавливались винты и монтировалась транспедикулярная система.

В послеоперационном периоде выполняли наблюдение в сроки 3, 6, 12 мес. При контрольных осмотрах пациенты проходили обследование с применением ВАШ и индекса ограничения жизнедеятельности по опроснику Освестри. Кроме того, в срок 3 мес выполняли контрольные спондилограммы, в сроки 6 и 12 мес — КТ позвоночника. Регистрировали случаи с признаками нестабильности имплантатов. Рентгенологическими критериями нестабильности служили разобщение или поломка компонентов фиксатора, резорбция костной ткани вокруг винта более 1 мм или формирование признака double halo — рентгенопрозрачной зоны вокруг винта, окруженной зоной склероза [11].

Статистический анализ данных. Для оценки разницы частот осложнений в группах применяли двусторонний точный тест Фишера, для оценки связи частоты осложнений с используемой хирургической техникой — логистический регрессионный анализ. При оценке результатов статистического анализа критическим уровнем статистической значимости являлось $p=0,05$. Статистический анализ проводили с помощью программного обеспечения Statistica 12.0 (StatSoft Inc., США).

Результаты

За время наблюдения в группе пациентов, которым выполняли аугментацию с применением ПММА, рент-

генологические признаки нестабильности фиксации выявлены у 11 человек (28,2%), из них расшатывание фиксатора — у 9, поломка компонентов фиксатора — у 2. Следует отметить, что расшатывание винтов в данной группе происходило в ножках позвонков, иначе говоря, имело место проксимальное расшатывание. Ревизионные оперативные вмешательства потребовались 8 пациентам (20,5%).

В группе пациентов, которым проводили аугментацию с применением разработанной техники (использование крошки из аутокости или аллокости), признаки нестабильности фиксатора выявлены у 2 человек, из них только в одном случае потребовалось ревизионное вмешательство: в этом случае механизм дестабилизации соответствовал известному эффекту «очистителя лобового стекла» (windshield wiper effect).

В группе пациентов, которым не применяли аугментацию, рентгенологические признаки дестабилизации транспедикулярного инструментария отмечены в 43 случаях (46,2%), но клинически значимой дестабилизация имплантатов была только у 15 человек (16,1%), что потребовало применения ревизионных оперативных вмешательств. Во всех наблюдениях дестабилизация транспедикулярного фиксатора происходила за счет расшатывания винтов.

При сравнении частоты осложнений в группах выявлено, что проведение аугментации, основанной на применении ПММА, статистически значимо снижало частоту расшатывания винтов по данным КТ, $p=0,0185$ (двусторонний точный тест Фишера). Тем не менее, если в этой группе суммировать все виды нестабильности фиксатора — как расшатывание, так и поломку, то частота дестабилизации имплантатов по данным КТ становилась статистически незначимой по сравнению с контрольной группой, $p=0,0801$ (двусторонний точный тест Фишера). А применение аугментации на основе аутологичной и аллогенной костной крошки приводило к статистически значимому снижению частоты дестабилизации имплантатов по данным КТ, $p=0,0023$ (двусторонний точный тест Фишера).

Следует принимать во внимание возможное искажение данных за счет гетерогенности групп пациентов (включены пациенты с остеопорозом как с дегенеративной патологией, так и с травматическими повреждениями). С этой целью был выполнен логистический регрессионный анализ. В регрессионной модели частота дестабилизации имплантатов была зависимой переменной, предикторами являлись наличие у пациента дегенеративной патологии, аугментация на основе ПММА и аугментация на основе аллокости или аутокости. В итоге получена статистически значимая регрессионная модель: $\chi^2=17,9220$; $p=0,0005$ (см. таблицу).

Полученные результаты позволяют утверждать, что наличие у пациента дегенеративной патологии позвоночника является фактором риска развития

Параметры регрессионной модели

| Компонент регрессионного уравнения | Коэффициент и его статистическая значимость | Отношение шансов; 95% CI |
|---------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------|
| Свободный член уравнения | 0,5941 p=0,0437 | — |
| Дегенеративная патология | -0,8278 p=0,0285 | -0,4370; 0,2086-0,9156 |
| Аугментация ПММА | 0,0484 p=0,2708 | 1,6233; 0,6828-3,8597 |
| Аугментация аллокостью или аутокостью | 1,9973 p=0,0113 | 7,3694; 1,5812-34,3463 |

нестабильности фиксатора. Применение аугментации на основе аллогенной или аутологичной костной крошки статистически значимо снижает частоту осложнения, в то время как аугментация с применением ПММА не оказывает значимого влияния на частоту дестабилизации транспедикулярного фиксатора. Невысокая частота ревизионных вмешательств не позволила определить влияние техники аугментации на частоту клинически значимой дестабилизации транспедикулярного фиксатора.

Обсуждение

Увеличение в популяции людей пожилого возраста и урбанистический образ жизни являются причиной возрастающей частоты дегенеративных заболеваний поясничного отдела позвоночника и травматических повреждений, требующих оперативного лечения с применением транспедикулярной фиксации и спондилодеза [1, 2, 12]. У пациентов пожилого возраста также отмечается большая частота нарушения плотности костной ткани, что служит причиной развития нестабильности имплантатов и псевдоартроза и требует оценки состояния костной ткани перед оперативным лечением [13]. Для предоперационного обследования пациентов с дегенеративной патологией часто применяется КТ позвоночника. Во время исследования возможно также измерение и радиоденсивности губчатой ткани, которая детерминирована плотностью кальция в костной ткани [5, 13]. В настоящее время опубликованы данные, свидетельствующие о том, что костная плотность менее 110 НУ соответствует остеопорозу [13, 14]. В связи с тем, что результаты двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии (денситометрии) могут быть завышенными вследствие суммирования плотности костной ткани ножек позвонков, дугоотростчатых суставов и тел позвонков, именно радиоденсивность по данным КТ применялась в качестве критерия при отборе пациентов для выполнения исследования.

Для увеличения прочности фиксации винтов в костной ткани разработаны разные стратегии, включа-

ющие использование имплантатов с оптимальными свойствами, расширяющихся винтов и различных способов аугментации. В ходе биомеханических тестов, исследующих прочность на вырывание [6, 15], было доказано, что максимальную прочность транспедикулярных винтов обеспечивает аугментация с применением ПММА, однако используемый в них механизм расшатывания транспедикулярного фиксатора приводит к нестабильности у меньшинства пациентов. Наиболее частый механизм расшатывания винтов у пациентов с транспедикулярной фиксацией воспроизводит усталостный тест, причем стабильность винтов в этом случае значительно ниже, чем в тесте на вырывание [15, 16].

Одним из существенных недостатков применения ПММА является ограниченная возможность аугментации ножки позвонка. Это смещает точку опоры винта вентрально, в тело позвонка [17]. Ограниченная стабильность аугментированных винтов, выявляемая в усталостном тесте, и изменение биомеханики объясняют наблюдающееся при аугментации ПММА проксимальное расшатывание [18]. Как показали результаты исследования, аугментация ПММА не в полной мере решает проблему стабильности транспедикулярных винтов, поскольку сохраняется значимая частота проксимального расшатывания. Помимо этого, такая техника не позволяет предотвратить усталостный перелом фиксатора. Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод, что аугментация ПММА уменьшает частоту расшатывания винтов, но не снижает статистически значимо общую частоту дестабилизации фиксатора.

Вышеуказанные биомеханические недостатки аугментации ПММА, риск дренирования его в позвоночный канал, экстравертебральное дренирование цемента с развитием легкой эмболии, а также ограниченная биосовместимость ПММА, следствием которой является синдром имплантации костного цемента, обусловили необходимость разработки альтернативного способа аугментации, позволяющего выполнить в том числе и аугментацию ножки позвонка материалом, обладающим большей биологической совместимостью. В качестве материала, который можно использовать для аугментации, была предложена костная крошка. Первые результаты применения этой техники [19, 20] свидетельствовали о том, что она уступает по эффективности методике с применением ПММА.

В процессе работы нами был модифицирован данный способ аугментации и разработана методика, позволяющая создать гиперденсную область, многократно большую, чем диаметр винта, которая могла распространяться от краниальной до каудальной замыкательной пластины [21]. Предложенный способ обеспечил статистически значимое снижение частоты дестабилизации имплантатов, что свидетельствует о биомеханических преимуществах разработанной методики. Построенная регрессионная модель с учетом гетерогенности патологии в исследуемых группах

показала, что именно предложенный способ аугментации с применением костной крошки приводит к значимому снижению частоты дестабилизации транспедикулярного фиксатора.

Ограничение исследования. Результаты носят предварительный характер и не позволяют оценить клиническую эффективность разработанного способа в связи с низкой частотой встречаемости дестабилизации фиксатора, требующей ревизионного вмешательства. Для оценки клинического эффекта необходимо выполнение проспективного исследования с включением большего количества пациентов. Тем не менее полученные результаты позволяют сделать вывод, что разработанный способ значительно снижает частоту дестабилизации фиксатора и может иметь преимущество по сравнению с аугментацией на основе ПММА.

Заключение

Разработанный способ аугментации позвонков с применением костной крошки обеспечивает статистически значимое снижение частоты дестабилизации транспедикулярного фиксатора по данным КТ. За счет устранения биомеханических недостатков предложенный способ потенциально более эффективен у пациентов с нарушением плотности костной ткани, чем использование полиметилметакрилата.

Финансирование исследования. Работа не получила финансовой поддержки.

Конфликт интересов отсутствует.

Литература/References

- Li B., Sun C., Zhao C., Yao X., Zhang Y., Duan H., Hao J., Guo X., Fan B., Ning G., Feng S. Epidemiological profile of thoracolumbar fracture (TLF) over a period of 10 years in Tianjin, China. *J Spinal Cord Med* 2019; 42(2): 178–183, <https://doi.org/10.1080/10790268.2018.1455018>.
- Jensen R.K., Jensen T.S., Koes B., Hartvigsen J. Prevalence of lumbar spinal stenosis in general and clinical populations: a systematic review and meta-analysis. *Eur Spine J* 2020; 29(9): 2143–2163, <https://doi.org/10.1007/s00586-020-06339-1>.
- Wu Z.X., Gong F.T., Liu L., Ma Z.S., Zhang Y., Zhao X., Yang M., Lei W., Sang H.X. A comparative study on screw loosening in osteoporotic lumbar spine fusion between expandable and conventional pedicle screws. *Arch Orthop Trauma Surg* 2012; 132(4): 471–476, <https://doi.org/10.1007/s00402-011-1439-6>.
- Röllinghoff M., Schlüter-Brust K., Groos D., Sobottke R., Michael J.W., Eysel P., Delank K.S. Mid-range outcomes in 64 consecutive cases of multilevel fusion for degenerative diseases of the lumbar spine. *Orthop Rev (Pavia)* 2010; 2(1): e3, <https://doi.org/10.4081/or.2010.e3>.
- Zou D., Sun Z., Zhou S., Zhong W., Li W. Hounsfield units value is a better predictor of pedicle screw loosening than the T-score of DXA in patients with lumbar degenerative diseases. *Eur Spine J* 2020; 29(5): 1105–1111, <https://doi.org/10.1007/s00586-020-06386-8>.
- Shea T.M., Laun J., Gonzalez-Blohm S.A., Doulgeris J.J., Lee W.E., Aghayev K., Vrionis F.D. Designs and techniques that improve the pullout strength of pedicle screws in osteoporotic vertebrae: current status. *Biomed Res Int* 2014; 2014: 748393, <https://doi.org/10.1155/2014/748393>.
- Krueger A., Bliemel C., Zettl R., Ruchholtz S. Management of pulmonary cement embolism after percutaneous vertebroplasty and kyphoplasty: a systematic review of the literature. *Eur Spine J* 2009; 18(9): 1257–1265, <https://doi.org/10.1007/s00586-009-1073-y>.
- Donaldson A.J., Thomson H.E., Harper N.J., Kenny N.W. Bone cement implantation syndrome. *Br J Anaesth* 2009; 102(1): 12–22, <https://doi.org/10.1093/bja/aen328>.
- Guo H.Z., Tang Y.C., Guo D.Q., Zhang S.C., Li Y.X., Mo G.Y., Luo P.J., Zhou T.P., Ma Y.H., Liang D., Jiang X.B. The cement leakage in cement-augmented pedicle screw instrumentation in degenerative lumbosacral diseases: a retrospective analysis of 202 cases and 950 augmented pedicle screws. *Eur Spine J* 2019; 28(7): 1661–1669, <https://doi.org/10.1007/s00586-019-05985-4>.
- Leone A., Guglielmi G., Cassar-Pullicino V.N., Bonomo L. Lumbar intervertebral instability: a review. *Radiology* 2007; 245(1): 62–77, <https://doi.org/10.1148/radiol.2451051359>.
- Galbusera F., Volkheimer D., Reitmaier S., Berger-Roscher N., Kienle A., Wilke H.J. Pedicle screw loosening: a clinically relevant complication? *Eur Spine J* 2015; 24(5): 1005–1016, <https://doi.org/10.1007/s00586-015-3768-6>.
- Gothard D., Smith E.L., Kanczler J.M., Rashidi H., Qutachi O., Henstock J., Rotherham M., El Haj A., Shakesheff K.M., Oreffo R.O. Tissue engineered bone using select growth factors: a comprehensive review of animal studies and clinical translation studies in man. *Eur Cell Mater* 2014; 28: 166–208, <https://doi.org/10.22203/ecm.v028a13>.
- Schwaiger B.J., Gersing A.S., Baum T., Noël P.B., Zimmer C., Bauer J.S. Bone mineral density values derived from routine lumbar spine multidetector row CT predict osteoporotic vertebral fractures and screw loosening. *AJNR Am J Neuroradiol* 2014; 35(8): 1628–1633, <https://doi.org/10.3174/ajnr.A3893>.
- Zaidi Q., Danisa O.A., Cheng W. Measurement techniques and utility of Hounsfield unit values for assessment of bone quality prior to spinal instrumentation: a review of current literature. *Spine (Phila Pa 1976)* 2019; 44(4): E239–E244, <https://doi.org/10.1097/brs.0000000000002813>.
- Kueny R.A., Kolb J.P., Lehmann W., Püschel K., Morlock M.M., Huber G. Influence of the screw augmentation technique and a diameter increase on pedicle screw fixation in the osteoporotic spine: pullout versus fatigue testing. *Eur Spine J* 2014; 23: 2196–2202, <https://doi.org/10.1007/s00586-014-3476-7>.
- Bostelmann R., Keiler A., Steiger H.J., Scholz A., Cornelius J.F., Schmoelz W. Effect of augmentation techniques on the failure of pedicle screws under cranio-caudal cyclic loading. *Eur Spine J* 2017; 26(1): 181–188, <https://doi.org/10.1007/s00586-015-3904-3>.
- Weiser L., Huber G., Sellenschloh K., Viezens L., Püschel K., Morlock M.M., Lehmann W. Time to augment?! Impact of cement augmentation on pedicle screw fixation strength depending on bone mineral density. *Eur Spine J* 2018; 27(8): 1964–1971, <https://doi.org/10.1007/s00586-018-5660-7>.

18. Choy W.J., Walsh W.R., Phan K., Mobbs R.J. Technical note: pedicle cement augmentation with proximal screw toggle and loosening. *Orthop Surg* 2019; 11(3): 510–515, <https://doi.org/10.1111/os.12467>.

19. Pfeifer B.A., Krag M.H., Johnson C. Repair of failed transpedicle screw fixation. A biomechanical study comparing polymethylmethacrylate, milled bone, and matchstick bone reconstruction. *Spine (Phila Pa 1976)* 1994; 19(3): 350–353, <https://doi.org/10.1097/00007632-199402000-00017>.

20. Jia C., Zhang R., Xing T., Gao H., Li H., Dong F., Zhang J., Ge P., Song P., Xu P., Zhang H., Shen C. Biomechanical properties of pedicle screw fixation augmented

with allograft bone particles in osteoporotic vertebrae: different sizes and amounts. *Spine J* 2019; 19(8): 1443–1452, <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2019.04.013>.

21. Боков А.Е., Млявых С.Г., Алейник А.Я., Булкин А.А., Кулакова К.В. Способ стабилизации позвоночно-двигательного сегмента транспедикулярным инструментарием у пациентов с остеопорозом позвоночника. Патент РФ 2663940. 2018.

Bokov A.E., Mlyavykh S.G., Aleynik A.Ya., Bulkin A.A., Kulakova K.V. Method of stabilization of the spinal-motion segment with transpedicular instruments in patients with osteoporosis of spine. Patent RU 2663940. 2018.