

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Приволжский исследовательский медицинский университет»
Министерства здравоохранения Российской Федерации

На правах рукописи

БОКОВ АНДРЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ

ХИРУРГИЧЕСКАЯ ТАКТИКА ПРИ ДЕГЕНЕРАТИВНОМ И
ПОСТТРАМАТИЧЕСКОМ СТЕНОЗЕ ПОЗВОНОЧНОГО КАНАЛА У
ПАЦИЕНТОВ С НАРУШЕНИЕМ ПЛОТНОСТИ КОСТНОЙ ТКАНИ

3.1.10. Нейрохирургия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

доктора медицинских наук

Научный консультант:

доктор медицинских наук, профессор РАН Гуца Артем Олегович

Нижний Новгород – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	23
1.1 Актуальность проблемы.....	23
1.2 Проблема оценки качества костной ткани в клинической практике и ограничения при прогнозировании развития нестабильности имплантатов.....	25
1.3 Факторы, влияющие на результаты хирургического лечения пациентов с дегенеративным и посттравматическим стенозом позвоночного канала	32
1.3.1 Особенности хирургической техники, влияющие на результаты оперативных вмешательств по поводу дегенеративного стеноза на фоне нестабильности сегмента.....	32
1.3.2 Влияние дизайна винта на прочность транспедикулярной фиксации	36
1.3.3 Применение не прямой декомпрессии в хирургии дегенеративных заболеваний позвоночника.....	39
1.3.4 Частные вопросы хирургической тактики при посттравматическом стенозе позвоночного канала на уровне поясничного отдела позвоночника и области грудопоясничного перехода.....	45
1.3.5 Противоречия, связанные с методами стабилизации с применением аугментации костной ткани	49
1.4 Технические решения, применяющиеся при нестабильности имплантатов .	55
ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ	61
2.1 Общая характеристика материала и этапов исследования	61
2.3 Анализ факторов, влияющих на результаты оперативного лечения у пациентов с дегенеративным стенозом позвоночного канала на фоне нестабильности сегмента	65
2.3.1 Общая характеристика этапа исследования.....	65
2.3.2 Предоперационное обследование пациентов с дегенеративным стенозом позвоночного канала на фоне нестабильности сегмента.....	67
2.3.3 Техники оперативных вмешательств при дегенеративном стенозе поясничного отдела позвоночника на фоне нестабильности сегмента.....	73
2.4 Исследование результатов не прямой декомпрессии корешков спинного мозга с применением спондилодеза из вентрального доступа	76

2.5 Анализ факторов, влияющих на результаты лечения пациентов с посттравматическим стенозом позвоночного канала на уровне поясничного отдела позвоночника и грудопоясничного перехода.....	77
2.5.1 Обследование пациентов с травматическими повреждениями поясничного отдела позвоночника и переходной грудопоясничной области.....	78
2.5.2 Хирургическая тактика при травматических повреждениях поясничного отдела позвоночника и переходной грудопоясничной области.....	79
2.6 Оценка эффективности аугментации костной ткани при оперативных вмешательствах с применением транспедикулярной фиксации.....	80
2.6.1 Предоперационное обследование пациентов.....	81
2.6.2 Хирургическая тактика и техника аугментации.....	83
2.7 Послеоперационное наблюдение пациентов.....	86
2.8 Разработка хирургической тактики и техники оперативных вмешательств у пациентов с несостоятельностью транспедикулярной фиксации.....	88
2.9 Статистический анализ данных	89
ГЛАВА 3 ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КОСТНОЙ ТКАНИ В КЛИНИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ И ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ РАЗВИТИЯ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ИМПЛАНТАТОВ	93
3.1 Построение модели риска низкоэнергетических переломов на основании радиоденсивности губчатого вещества тел позвонков по данным КТ – характеристики исследования.....	93
3.1.1 Результаты построения модели риска низкоэнергетических переломов на основании радиоденсивности губчатого вещества тел позвонков по данным КТ	94
3.2 Построение модели риска расшатывания транспедикулярного фиксатора на основе радиоденсивности – характеристика исследования.....	95
3.2.1 Результаты построения модели риска расшатывания транспедикулярного фиксатора на основе радиоденсивности.....	96
3.3 Обсуждение результатов	97
ГЛАВА 4 ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СТАБИЛЬНОСТЬ ИНСТРУМЕНТАЦИИ У ПАЦИЕНТОВ С ДЕГЕНЕРАТИВНЫМ СТЕНОЗОМ ПОЗВОНОЧНОГО КАНАЛА	100
4.1 Характеристика и особенности исследования	100
4.1.1 Результаты оценки факторов, влияющих на стабильность транспедикулярной фиксации у пациентов с дегенеративной патологией позвоночника	103

4.2 Влияние дизайна винтов на стабильность транспедикулярной фиксации – характеристика исследования.....	106
4.2.1 Результаты оценки дизайна винтов на стабильность транспедикулярной фиксации	108
4.3 Обсуждение результатов	111
ГЛАВА 5 НЕПРЯМАЯ ДЕКОМПРЕССИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПОНДИЛОДЕЗА ИЗ ВЕНТРАЛЬНОГО ДОСТУПА.....	116
5.1 Оценка КТ параметров, имеющих прогностическое значение для клиники стеноза позвоночного канала – характеристика исследования.....	117
5.1.1 Результаты построения клинико-рентгенологической корреляции	119
5.2 Рентгенологические результаты не прямой декомпрессии с применением спондилодеза из вентрального доступа у пациентов с центральным стенозом позвоночного канала – характеристики исследования	121
5.2.1 Результаты исследования рентгенологических результатов не прямой декомпрессии с применением спондилодеза из вентрального доступа.....	124
5.3 Клинико-рентгенологические результаты оперативного лечения с применением не прямой декомпрессии	131
5.4 Обсуждение результатов	137
ГЛАВА 6 ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЕРАТИВНОГО ЛЕЧЕНИЯ У ПАЦИЕНТОВ С ПОСТТРАВМАТИЧЕСКИМ СТЕНОЗОМ ПОЗВОНОЧНОГО КАНАЛА НА УРОВНЕ ПОЯСНИЧНОГО ОТДЕЛА И ГРУДОПОЯСНИЧНОГО ПЕРЕХОДА.....	141
6.1 Характеристика и особенности исследования	141
6.2 Результаты исследования факторов, влияющих на стабильность фиксации у пациентов с посттравматическим стенозом позвоночного канала на уровне поясничного отдела и грудопоясничного перехода	144
6.3 Обсуждение результатов	147
ГЛАВА 7 РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНИК АУГМЕНТАЦИИ КОСТНОЙ ТКАНИ ТЕЛ ПОЗВОНКОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ТРАНСПЕДИКУЛЯРНОЙ ФИКСАЦИИ.....	152
7.1 Характеристика и особенности исследования	152
7.2 Результаты применения аугментации на основе полиметилметакрилата	156
7.3 Результаты транспедикулярной фиксации с аугментацией тела позвонка костной крошкой и сравнение с методикой аугментации полиметилметакрилатом	158
7.4 Эффективность методик, основанных на аугментации костной ткани.....	162

7.5 Обсуждение результатов	166
ГЛАВА 8 РЕВИЗИОННЫЕ ВМЕШАТЕЛЬСТВА У ПАЦИЕНТОВ С ОГРАНИЧЕНИЕМ ПЛОТНОСТИ КОСТНОЙ ТКАНИ.....	172
8.1 Характеристика и особенности исследования	172
8.2 Обсуждение результатов	194
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	199
ВЫВОДЫ	214
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.....	216
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	219
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	220

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Одной из основных современных тенденций является увеличение средней продолжительности жизни населения, что приводит к постепенному изменению структуры основных заболеваний позвоночника, в частности к увеличению частоты дегенеративных заболеваний. Так, по результатам метаанализа, в настоящее время частота клинически значимого дегенеративного стеноза позвоночного канала составляет 11,0% с 95,0% доверительным интервалом 4,0 – 18,0%, средний возраст пациентов с данной патологией составляет 65 лет, диапазон 20 – 96 лет с незначительным преобладанием женщин (55,0%) [250]. Дегенеративный стеноз позвоночного канала является одним из наиболее частых показаний к выполнению оперативных вмешательств на позвоночнике, причем при нестабильности позвоночно-двигательных сегментов помимо декомпрессии требуется также выполнение транспедикулярной фиксации и спондилодеза [5, 138, 140].

Другой тенденцией является постепенное увеличение высокоэнергетической травмы позвоночника [124, 142]. Частота высокоэнергетической травмы составляет 6,9% ($\pm 3,8$, 95,0% CI), из общего количества частота осложненной травмы составляет 26,6% ($\pm 10,7$, 95,0% CI) [177]. В настоящее время принята АО-классификация повреждений области грудопоясничного перехода, которая имеет большое практическое значение, поскольку определяет алгоритм лечения пациентов [280]. Хирургическое лечение повреждений В и С типа с применением транспедикулярной фиксации является общепринятой хирургической тактикой, в то время, как переломы А3 и А4 типа считаются условно стабильными, при отсутствии значительного снижения высоты тела позвонка и кифотической деформации такие пациенты могут лечиться консервативно [315, 332].

Отдельно следует рассматривать низкоэнергетические переломы,

обусловленные остеопорозом позвоночника. Очевидно, что ранее принятая АО-классификация не применима, если нарушение плотности костной ткани является причиной костной деструкции, в связи с чем в настоящее время внедрена новая классификация [83]. В большинстве случаев при низкоэнергетических переломах на фоне остеопороза проводится консервативное или минимально инвазивное лечение с применением вертебропластики или кифопластики. Тем не менее, при OF4 или OF5 типах перелома требуется оперативное вмешательство с применением транспедикулярной фиксации, выполнение которой имеет высокий риск осложнений у этих пациентов [221].

Остеопороз является распространенной патологией в группе старшего возраста, и частота этого патологического состояния продолжает увеличиваться [266, 292]. Опубликованы данные, что это заболевание выявляется в 14,0 – 28,5% наблюдений после 50 лет, причем у женщин частота составляет 24,0%, у мужчин – 6,0% [331]. Нарушение костной плотности является фактором риска двух взаимосвязанных осложнений – псевдоартроза и нестабильности фиксатора, таким образом оказывая значительное негативное влияние на результаты оперативных вмешательств на позвоночнике, в ходе которых применяются декомпрессия корешков и спинного мозга, спондилодез и транспедикулярная фиксация [47, 82]. В настоящее время известно, что псевдоартроз развивается у 10,0 – 40,0% из 200000 пациентов, оперируемых ежегодно в США с применением транспедикулярной фиксации и межтелового спондилодеза [302, 322]. Частота расшатывания имплантатов по данным литературы значительно варьирует от 0,7 до 27,0%, и может превышать 50,0% у пациентов с остеопорозом, особенно в случае применения многоуровневой фиксации [1, 146, 207]. Чаще всего диагностика данных осложнений основывается на результатах инструментальных исследований, но, как показали результаты анализа, КТ-признаки псевдоартроза и расшатывания транспедикулярных винтов могут быть асимптоматичными. По этой причине даже в названиях научных работ, посвященных вышеуказанной проблеме, приводится уточнение, что учитывались только клинически значимые осложнения [146].

Отсутствие симптоматики у значительной части пациентов с КТ-признаками

расшатывания винтов также вызывает вопрос о том, какова клиническая значимость данных находок [231]. Неполная корреляция КТ-данных с клинической картиной и необходимость применения шкал для оценки боли и ограничения жизнедеятельности дополнительно затрудняет оценку результатов, поскольку источник боли может не иметь отношения к ранее выполненной операции [34, 258]. Большая распространённость патологии, требующей применения транспедикулярной фиксации и спондилодеза делает актуальной разработку методологии научных исследований, направленных на решение проблемы осложнений у пациентов с нарушением костной плотности после декомпрессивно-стабилизирующих операций на позвоночнике.

Доказано, что одним из наиболее важных факторов, обеспечивающих стабильность транспедикулярной фиксации, является качество костной ткани [106]. Для оценки свойств костной ткани чаще всего используется концентрация кальция, поскольку доказано, что этот параметр коррелирует с её механическими свойствами [54, 165, 312]. С целью определения концентрации кальция в костной ткани в клинической работе и при выполнении научных исследований используются количественная компьютерная томография и остеоденситометрия (DXA или Dual-energy X-ray absorptiometry, англ.) Рутинное применение количественной томографии для оценки свойств костной ткани не оправдано вследствие дороговизны исследования и экспозиции ионизирующего излучения [42]. Остеоденситометрия зарекомендовала себя как приемлемый скрининговый метод для диагностики остеопороза, и соответствующий диагноз чаще всего устанавливают на основании результатов именно этого исследования [30, 109, 126, 281]. Тем не менее, известно, что метод не обладает достаточной точностью для прогнозирования осложнений, обусловленных нарушением плотности костной ткани. Одной из причин является то, что метод остеоденситометрии представляет собой суммарный результат исследования костной плотности, на который могут оказать влияние гипертрофические изменения дугоотростчатых суставов и даже кальцификаты в аорте, это объясняет несогласованность данных КТ и остеоденситометрии [335]. В настоящее время найдена альтернатива

остеоденситометрии, основанная на определении радиоденсивности по данным КТ, и доказано, что этот параметр коррелирует с частотой развития псевдоартроза и расшатывания имплантатов [336]. Несмотря на то, что опубликовано значительное количество работ, посвященных оценке данных зависимостей, модель для прогнозирования этих осложнений не предложена. Причина может заключаться в том, что многие факторы могут повлиять на частоту осложнений после оперативных вмешательств с применением транспедикулярной фиксации и спондилодеза, и качество костной ткани – лишь один из них [234].

В связи со значительной частотой дестабилизации имплантатов и псевдоартроза, особенно у пациентов, оперированных по поводу патологии поясничного отдела позвоночника и переходной грудопоясничной области, длительное время ведется разработка стратегий для увеличения прочности фиксации. Опубликованы данные, что значительное влияние на стабильность фиксации может оказать хирургическая тактика, в частности, протяженность фиксации, люмбосакральная фиксация, применение межтелового спондилодеза и наличие биомеханических нарушений [21, 207, 234, 267, 307]. Дополнительно увеличить стабильность винтов может применение бикортикальной фиксации и выбор оптимального дизайна винта, тем не менее, опубликованные данные, посвященные этому вопросу, не лишены противоречий [106]. Не достаточно исследовано влияние типа спондилодеза на стабильность фиксации, поскольку результаты, полученные в ходе биомеханических исследований, значительно варьируют, не позволяя сделать окончательных выводов [36, 55, 61]. Причиной несогласованности выводов, основанных на результатах указанных исследований, является то, что многие из них получены в ходе биомеханических тестов *ex-vivo*, кроме того, чаще всего применялись тесты на вырывание. Известно, что такой механизм вызывает дестабилизацию имплантатов у меньшинства пациентов [64, 161]. В связи с этим необходимо уточнение клинической значимости опубликованных результатов биомеханических исследований.

Тема выполнения декомпрессии при оперативных вмешательствах на позвоночнике кажется изученной, но не исключено, что объем резекции костных

структур и связок может повлиять на ближайшие и отделенные результаты. С одной стороны, экстенсивная резекция структур задней опорной колонны с восстановлением нормальных размеров позвоночного канала и межпозвонковых отверстий обеспечит хорошую декомпрессию, максимально благоприятствующую регрессу неврологических нарушений. С другой стороны, при чрезмерной резекции этих структур происходит дестабилизация позвоночно-двигательных сегментов, что может увеличить нагрузку на имплантаты [234]. Также экстенсивная декомпрессия будет препятствовать формированию резервного заднего костного блока, что может привести к отрицательному эффекту у пациентов с нарушением плотности костной ткани [1]. Это диктует необходимость детального изучения клинико-рентгенологических корреляций, которые помогли бы обосновать необходимый объем декомпрессии как при дегенеративной патологии позвоночника, так и при травматических повреждениях.

Одной из современных тенденций в хирургии дегенеративных заболеваний позвоночника является применение непрямой декомпрессии невральных структур за счет восстановления высоты межпозвонкового промежутка из переднего доступа. В настоящее время получены данные о высокой эффективности этого метода, особенно при фораминальном стенозе позвоночного канала [245]. Противоречивыми являются выводы об эффективности непрямой декомпрессии при центральном стенозе позвоночного канала, поскольку имеется очень большой разброс опубликованных данных [127, 159, 309]. Суммируя опубликованные исследования, можно сделать заключение, что эффект непрямой декомпрессии спрогнозировать сложно, так как результаты корреляционного анализа при оценке факторов, влияющих на рентгенологический результат, сильно отличаются [180, 259]. Неоднородность полученных результатов может свидетельствовать о несовершенстве дизайна исследований, в частности, о присутствии неучтенных факторов, которые являются причиной противоречий и несогласованности опубликованных исследований.

Результаты хирургического лечения травматических повреждений поясничного отдела позвоночника и груднопоясничной области изучаются

длительное время, но именно в этой области знаний противоречия настолько сильны, что не позволяют выработать унифицированных подходов к лечению травматических повреждений позвоночника [175, 278]. До настоящего времени обсуждается обоснованность и необходимость промежуточной фиксации [175, 268]. Отличаются мнения в отношении показаний к выполнению переднего спондилодеза [33, 40, 278]. Продолжается дискуссия о необходимой протяженности фиксации для обеспечения стабильности при травмах позвоночника в переходной грудопоясничной области [68, 129]. Крайне редко обсуждается рациональное применение техники и необходимого объема декомпрессии, а также влияние резекции костных структур и связок на отдаленные результаты оперативного лечения травматических повреждений. Как при дегенеративных заболеваниях позвоночника, так и при травматической патологии избыточная резекция костных структур может препятствовать формированию костного блока с последующей дестабилизацией оперированных сегментов, что в итоге сведет на нет хорошие ближайшие результаты. Избыточный объем оперативного вмешательства с применением протяженной фиксации, а также необоснованное расширение показаний к переднему спондилодезу также может привести к негативным последствиям, увеличивая травматичность операции и ее ресурсоемкость. Таким образом, не утрачена актуальность разработки дифференцированной тактики лечения травматических повреждений позвоночника.

При выраженном нарушении плотности костной ткани использование имплантатов оптимального дизайна и максимально стабильного спондилодеза может оказаться недостаточным для обеспечения стабильности оперированных сегментов. В этом случае требуется аугментация костной ткани, и наиболее часто применяющимися способами являются аугментация цементом на основе полиметилметакрилата (ПММА) и кальция фосфата [297]. Среди всех разработанных технологий максимальную стабильность винта в костной ткани обеспечивает аугментация ПММА, увеличивая резистентность винта к вырыванию в 25 – 348 раз [106]. С другой стороны, в усталостном тесте эффект применения

этой техники оказался существенно меньше, а именно эта методика лучше всех воспроизводит механизм дестабилизации фиксатора у подавляющего большинства пациентов [117, 161]. Следует отметить, что методика аугментации ПММА имеет и очевидные недостатки. Сообщается о большой частоте дренирования цемента в позвоночный канал и паравертебральное сосудистое русло, что может привести к компрессии и термическому повреждению корешков и спинного мозга, также зарегистрированы случаи с цементной легочной эмболией [77, 273, 300]. Описан так называемый синдром имплантации цемента, клиническими проявлениями которого может быть кардиосупрессия и гипотензия. Указанное негативное влияние на гемодинамику может стать причиной внезапной смерти в раннем послеоперационном периоде [70]. Недостатки аугментации с применением жидкого цемента являлись причиной разработки альтернативных технологий таких, как расширяющиеся винты и якоря [106]. В настоящее время у пациентов с нарушением плотности костной ткани для увеличения стабильности фиксации применяются расширяющиеся винты, но по прочности такая фиксация уступает методикам, основанным на аугментации цементом [106]. Также остается спорным вопрос о выполнимости ревизионных вмешательств в случае поломки расширяющихся винтов [153]. Все указанные особенности указанных технологий обосновывают необходимость дальнейшего изучения эффективности методик, основанных на аугментации костной ткани и поиска альтернатив применению жидкого цемента.

Степень разработанности темы исследования

По данным опубликованных исследований, частота ревизионных вмешательств после декомпрессивно-стабилизирующих вмешательств на позвоночнике сильно варьирует от минимальных значений до 10,0 – 40,0%, причем псевдоартроз и расшатывание винтов являются наиболее частыми причинами [207]. Приведенная выше статистика иллюстрирует актуальность темы и масштабы негативных последствий, обусловленных сохраняющейся значительной частотой неудач после оперативных вмешательств с применением транспедикулярной

фиксации и спондилодеза по поводу дегенеративной патологии и травматических повреждений позвоночника. Учитывая вышеизложенное, важна также разработка технических решений для выполнения ревизионных вмешательств, особенно у пациентов с нарушением плотности костной ткани. Несмотря на то, что в мире ежегодно выполняется значительное количество ревизионных операций, подходы к их выполнению не систематизированы. Отдельно рассматриваются подходы к вмешательству по поводу нестабильности фиксатора и псевдоартроза, несмотря на то, что эти осложнения взаимосвязаны, и такая односторонняя направленность ревизионной хирургии может привести к серии неудач [67, 151]. В частности, ни один способ аугментации не сможет предотвратить усталостные переломы фиксатора, и, следовательно, требуется детальное изучение причин осложнения с применением нескольких технических решений для его устранения.

Подводя итоги, в настоящее время необходима разработка тактики хирургического лечения пациентов с посттравматическими и дегенеративными стенозами позвоночного канала на фоне нарушения плотности костной ткани и нестабильности позвоночно-двигательного сегмента (ПДС), поскольку пропорция таких пациентов будет только увеличиваться. Необходима разработка модели для оценки риска развития осложнений у таких пациентов с максимально возможным учетом вклада каждого фактора, влияющего на частоту развития осложнений. Это поможет разрешить противоречия, наблюдающиеся в опубликованных материалах, посвященных лечению дегенеративной патологии и травматических повреждений позвоночника. Также следует изучить возможности повлиять на частоту возникновения осложнений за счет оптимальной хирургической тактики, включающей обоснованную методику декомпрессии, оптимальное использование имплантатов, что позволит более рационально применять ресурсоемкие вмешательства с применением аугментации.

Учитывая риски и недостатки имеющихся технологий для выполнения аугментации костной ткани, необходима разработка более безопасных и эффективных технических решений. В случае развития осложнений, обусловленных нарушением плотности костной ткани, необходима разработка

максимально эффективных комплексных решений для предотвращения повторных неудач.

Цель исследования

Разработать дифференцированную хирургическую тактику у пациентов с дегенеративным и посттравматическим стенозом позвоночного канала на уровне поясничного отдела позвоночника и грудопоясничного перехода при нарушении плотности костной ткани и технику ревизионных вмешательств при осложнениях, обусловленных нарушением плотности костной ткани.

Задачи исследования

1. Установить связь между радиоденсивностью костной ткани в единицах Хаунсфилда и частотой низкоэнергетических переломов, проанализировать возможность построения модели для дестабилизации имплантатов на основе радиоденсивности костной ткани.

2. Оценить факторы, влияющие на результаты декомпрессивно-стабилизирующих оперативных вмешательств с применением транспедикулярной фиксации при дегенеративном стенозе позвоночного канала, и разработать дифференцированную тактику с учетом нарушения плотности костной ткани, хирургической техники и характеристик имплантатов.

3. Оценить клинические и рентгенологические результаты не прямой декомпрессии корешков спинного мозга при выполнении переднего спондилодеза DLIF и ALIF, уточнить показания к не прямой декомпрессии.

4. Оценить факторы, влияющие на результаты оперативного лечения травматических повреждений на уровне поясничного отдела позвоночника и грудопоясничного перехода с учетом нарушения плотности костной ткани, и разработать дифференцированную тактику оперативного лечения.

5. Разработать способ аугментации позвонков без применения жидкого цемента с проведением сравнительного анализа с существующими методами.

6. Разработать способы ревизионных вмешательств при осложнениях

после декомпрессивно-стабилизирующих вмешательств с применением транспедикулярной фиксации, обусловленных нарушением плотности костной ткани.

Научная новизна исследования

Впервые проведена оценка связи радиоденсивности с частотой низкоэнергетических переломов и частотой расшатывания транспедикулярного фиксатора с построением моделей для их прогнозирования и последующей оценкой возможности применения этих моделей.

Впервые проведена оценка факторов и их индивидуального вклада, влияющего на стабильность транспедикулярного фиксатора у пациентов с дегенеративным стенозом позвоночного канала с последующей разработкой дифференцированной тактики в условиях нарушения плотности костной ткани.

Впервые выполнена оценка влияния дизайна винта на стабильность транспедикулярной фиксации, на основании чего разработана полезная модель имплантата с оптимальными характеристиками.

Впервые определены критические размеры позвоночного канала, при которых возможна непрямая декомпрессия корешков спинного мозга, проанализирован эффект не прямой декомпрессии и факторы, влияющие на результат.

Впервые проведена оценка факторов, влияющих на стабильность фиксатора при травматических повреждениях поясничного отдела позвоночника и грудопоясничного перехода, проанализирован их индивидуальный вклад и разработана дифференцированная хирургическая тактика.

Разработаны новые способы аугментации тел позвонков при открытой и перкутанной транспедикулярной фиксации без применения жидкого костного цемента, определена его эффективность и сопоставлена с результатами применения аугментации на основе полиметилметакрилата.

Впервые разработаны и систематизированы технические решения при осложнениях, обусловленных нарушением плотности костной ткани.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Уточнена значимость радиоденсивности костной ткани для модели риска низкоэнергетических переломов и дестабилизации фиксатора после декомпрессивно-стабилизирующих вмешательств по поводу дегенеративного и посттравматического стеноза позвоночного канала по данным КТ. Разработаны основы оценки факторов риска дестабилизации имплантатов при дегенеративной патологии и травматических повреждениях позвоночника поясничной и переходной грудопоясничной области. Разработана дифференцированная тактика с учетом типа спондилодеза, объема резекции структур задней опорной колонны у пациентов с дегенеративным стенозом поясничного отдела позвоночника. Уточнены границы эффективности применения не прямой декомпрессии при дегенеративной патологии позвоночника и проанализированы факторы, влияющие на ее результат. Обоснован рациональный выбор техники декомпрессии и стабилизации при травматических повреждениях позвоночника. На основании результатов исследования разработана полезная модель – транспедикулярный винт с оптимальными свойствами (патент на полезную модель «Педикулярный винт» RU 195876 U1, зарегистрирован в Федеральной службе по интеллектуальной собственности Российской Федерации, опубликован: 07.02.2020 Бюл. № 4), повышающими эффективность применения при нарушении плотности костной ткани. Разработаны новые способы стабилизации позвоночно-двигательных сегментов у пациентов с нарушением плотности костной ткани, основанные на аугментации позвонков костной крошкой при открытых и перкутанных оперативных вмешательствах (патент на изобретение «Способ стабилизации позвоночно-двигательного сегмента транспедикулярным инструментарием у пациентов с остеопорозом позвоночника» RU 2663940 C1, зарегистрирован в Федеральной службе по интеллектуальной собственности Российской Федерации, опубликован: 13.08.2018 Бюл. № 23). Разработан «Способ минимально инвазивной стабилизации позвоночно-двигательного сегмента на уровне поясничного отдела позвоночника» (патент RU 2645418 C1, зарегистрирован в Федеральной службе по интеллектуальной собственности Российской Федерации, опубликован: 21.02.2018

Бюл. № 6). Разработан «Способ доступа к структурам различных отделов позвоночника и устройство для его осуществления» (патент RU 2720709 C1, зарегистрирован в Федеральной службе по интеллектуальной собственности Российской Федерации, опубликован: 12.05.2020 Бюл. № 14). Разработан «Способ стабилизации позвоночно-двигательного сегмента минимально инвазивным транспедикулярным инструментарием у пациентов с остеопорозом позвоночника» (патент RU 2742593 C1, зарегистрирован в Федеральной службе по интеллектуальной собственности Российской Федерации, опубликован: 08.02.2021 Бюл. № 4).

Методология и методы исследования

Данная научно-исследовательская работа является клинической и выполнена в несколько этапов. Для решения первой задачи выполнены поперечные (одномоментные) исследования. Проведена оценка взаимосвязи механической прочности губчатой костной ткани тел позвонков и ее радиоденсивности. С этой целью проанализированы результаты КТ-исследований 100 пациентов в возрасте старше 40 лет с впервые возникшими болями в поясничном отделе позвоночника. С применением логистического регрессионного анализа была оценена прогностическая значимость радиоденсивности в отношении развития низкоэнергетических переломов позвонков. На группе из 526 пациентов, проходивших лечение в университетской клинике с 2009 года по 2020 год с применением логистического регрессионного анализа оценено качество модели прогнозирования расшатывания транспедикулярных винтов, основанной на данных радиоденсивности.

Учитывая недостаточную точность ранее построенной модели риска расшатывания транспедикулярных винтов, выполнена оценка дополнительных факторов, влияющих на результаты лечения пациентов с дегенеративными заболеваниями позвоночника, с этой целью проведен амбиспективный анализ результатов лечения 331 пациента. При построении модели учитывались радиоденсивность, протяженность фиксации, метод спондилодеза, полнота

редукции позвонка при спондилолистезе, люмбосакральная фиксация и степень резекции структур задней опорной колонны, выполнявшейся для декомпрессии корешков. Критерии расшатывания винтов были общеприняты – рентгенпрозрачная зона вокруг винтов не менее 1 мм и признак двойного контура (double halo sign, англ.), срок наблюдения составил 18 месяцев, который считается достаточным для завершения формирования костного блока. С применением множественного логистического регрессионного анализа построена многофакторная модель оценки риска дестабилизации транспедикулярных винтов. Для оценки влияния дизайна винтов на стабильность фиксации из данной группы была сформирована выборка из 175 пациентов, которая была стандартизована по типу выполненного спондилодеза и параметрам транспедикулярных винтов. Повторно с использованием множественного логистического регрессионного анализа была выполнена оценка факторов, влияющих на результаты лечения пациентов с дегенеративной патологией позвоночника. Помимо ранее перечисленных факторов учитывались также наружный и внутренний диаметр винтов, тип резьбы, резьбовой шаг и геометрия имплантата.

Для выполнения второй задачи было выполнено поперечное исследование, включающее 104 пациента. С использованием логистического регрессионного анализа получено было уравнение, которое исследовалось с применением ROC-кривых для вычисления критических значений параметров позвоночного канала, обладающие максимальной точностью в отношении выявления неврологической симптоматики в положении лежа, когда исключался динамический компонент стеноза позвоночного канала. Для оценки рентгенологических результатов не прямой декомпрессии с применением спондилодеза из вентрального доступа была сформирована выборка из 80 пациентов, которым выполнялась КТ до и после операции, методом множественного регрессионного анализа построены модели для прогнозирования рентгенологических результатов при центральном и латеральном стенозе позвоночного канала. На завершающем этапе этого фрагмента исследования сопоставлены клинические и рентгенологические результаты лечения у пациентов, которым проводилась не прямая декомпрессия корешков с

применением спондилодеза из вентрального доступа; с применением кернелизованного дискриминантного анализа определены целевые значения рентгенологических параметров позвоночного канала, необходимых для достижения клинического эффекта.

Для выполнения четвертой задачи выполнен амбиспективный анализ результатов лечения 204 пациентов с нестабильными повреждениями поясничного отдела и груднопоясничного перехода. Минимальный срок наблюдения составил 18 месяцев. Для оценки результатов лечения использовались общепринятые критерии расшатывания винтов – рентгенпрозрачная зона 1 мм и признак «двойного контура». При выполнении логистического регрессионного анализа использовались следующие потенциальные факторы, влияющие на результаты лечения: радиоденсивность губчатой ткани позвонков, методика декомпрессии, выполнение реконструкции передней порочной колонны и промежуточной фиксации, люмбосакральная фиксация, протяженность фиксации и остаточная деформация более 10°. Для оценки факторов риска клинически значимой дестабилизации имплантатов введены дополнительные переменные – степень формирования переднего и заднего костного блока. Для построения модели оценки риска использовался ядерный дискриминантный анализ.

Для решения пятой задачи выполнено проспективное нерандомизированное исследование, включавшее 189 пациентов с дегенеративным стенозом поясничного отдела позвоночника или с нестабильным травматическим повреждением поясничного отдела позвоночника и груднопоясничного перехода с выявленным по данным КТ или остеоденситометрии остеопорозом позвоночника (радиоденсивность ниже 110 НУ или Т-критерий < -2,5). Срок наблюдения составил 18 месяцев, результаты прослежены у 152 пациентов (80,4%). Пациенты разделены на 3 группы: в первой группе выполнялась аугментация позвонков полиметилметакрилатом, результаты прослежены у 38 пациентов; во второй группе выполнялась аугментация с применением разработанного способа, результаты прослежены у 21 пациента. В контрольной группе не выполнялась аугментация позвонков, результаты прослежены у 93 пациентов. С применением

логистического регрессионного анализа выполнена оценка факторов риска дренирования цемента в позвоночный канал. Проведен сравнительный анализ результатов оперативных вмешательств с применением транспедикулярной фиксации в контрольной группе пациентов, которым применялась аугментация с применением полиметилметакрилата и разработанный способ аугментации.

Для выполнения шестой задачи систематизированы технические решения, применявшиеся у пациентов с клинически значимой нестабильностью фиксатора. Статистический анализ в данном случае не применим по причине неоднородности группы пациентов, которым проводились ревизионные вмешательства. Данный фрагмент исследования представлен анализом отдельных наблюдений.

Положения, выносимые на защиту

1. Радиоденсивность по данным КТ в единицах Хаунсфилда имеет связь с механическими свойствами костной ткани, но построение модели прогнозирования дестабилизации имплантатов на основании этого параметра ограничено в связи с множеством факторов, влияющих на частоту осложнения.

2. На стабильность фиксации при дегенеративных заболеваниях позвоночника помимо качества костной ткани влияют методика декомпрессии, техника спондилодеза, протяженность фиксации, и свойства имплантатов.

3. Непрямая декомпрессия корешков спинного мозга с использованием спондилодеза из вентрального доступа достигается за счет восстановления высоты межпозвонкового промежутка в дорзальных отделах и редукции позвонка.

4. При операциях по поводу травматических повреждений позвоночника стабильность фиксации значительно увеличивается за счет применения промежуточной фиксации и реконструкции передней опорной колонны, а также зависит от техники декомпрессии спинного мозга и корешков.

5. Разработанный способ стабилизации позвоночно-двигательного сегмента транспедикулярным инструментарием у пациентов с остеопорозом позвоночника имеет эффективность, не отличающуюся от методики транспедикулярной фиксации с применением полиметилметакрилата.

6. При ревизионных вмешательствах необходимо учитывать, как риски развития дестабилизации винтов, так и псевдоартроза, применяя одновременно несколько технических решений для достижения эффекта.

Степень достоверности и апробация результатов исследования

Достоверность основных положений и выводов выполненного исследования обусловлена глубоким анализом современных научных публикаций по изучаемой проблеме, обследованием достаточного количества больных (объем выборки для выполнения каждой задачи определялся на основании анализа мощности с применением метода Монте-Карло, 2000 симуляций). Для оценки результатов исследования использованы общепризнанные шкалы и критерии. Минимальный срок наблюдения составил 18 месяцев, что считается достаточным для формирования костного блока на уровне оперированных сегментов. В проведенном исследовании использованы современные методы статистической обработки, соответствующие поставленным задачам. Исследование проводилось с использованием профессиональных программ статистического анализа. Выводы исследования основаны на проверяемых базах данных, доступных в электронных медицинских картах пациента.

Основные результаты исследования доложены и обсуждены на международных конгрессах: Global Spine Congress 2015 (Buenos-Aires, Argentina, 20.05.2015 – 23.05.2015), Global Spine Congress 2017 (Милан, Италия, 03.05.2017 – 06.05.2017), Global Spine Congress 2018 (Сингапур, 02.05.2018 – 05.05.2018), World Spine 8 (Порту, Португалия, 13.04.2018 – 18.04.2018); в рамках Global Spine Congress 2019 (Канада, Торонто, 15.05.2019 – 18.05.2019) по результатам исследования организован симпозиум; на всероссийских научно-практических конференциях: Технологические инновации в травматологии, ортопедии и нейрохирургии: интеграция науки и практики (Саратов, 26.04.2017 – 28.04.2017), X Съезд ассоциации хирургов-вертебрологов (Москва, 30.05.2019 – 01.06.2019), XI Съезд ассоциации вертебрологов (Нижний Новгород, 02.06.2021 – 05.06.2021), Съезд нейрохирургов приволжского округа (Санкт-Петербург, 23.09.2021 –

25.09.2021), XI Научно-практическая конференция «Илизаровские чтения» (Курган, 16.06.2021 – 18.06.2021); на заседании кафедры травматологии, ортопедии и нейрохирургии им. М.В. Колокольцева ФГБОУ ВО «ПИМУ» Минздрава России (протокол № 23/22 от 27.09.22).

Публикации по теме диссертации

По теме диссертационного исследования опубликовано 24 печатных работы, из них 13 статей - в научных рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России для публикации основных научных результатов диссертации, 6 статей – в зарубежных рецензируемых журналах (индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science), 5 патентов на изобретения, а также 11 работ – в виде тезисов и материалах в сборниках российских и международных конференций, съездов и конгрессов.

Объем и структура диссертации

Диссертация изложена на 258 страницах машинописного текста, содержит 39 рисунков и 20 таблиц, состоит из введения, 8 глав (обзор литературы, характеристика материала и методов исследования, собственные результаты и их обсуждение), заключения, выводов, практических рекомендаций, списка сокращений и списка литературы, состоящего из 338 источников (26 отечественных и 312 зарубежных).

ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Актуальность проблемы

Особенностями современного общества являются урбанистический образ жизни и увеличение ее продолжительности, что приводит к увеличению частоты возникновения травматических повреждений и дегенеративных заболеваний позвоночника. Одним из наиболее частых показаний к оперативному лечению является дегенеративный стеноз позвоночника, распространенность которого в популяции достигает 11,0% [4]. В случае нестабильности позвоночно-двигательного сегмента при данной патологии помимо декомпрессии также требуется выполнение его стабилизации. Транспедикулярная фиксация и различные виды спондилодеза являются в этом случае наиболее эффективными методами, позволяющими достигнуть клинически значимого результата [3]. В настоящее время доказано, что хирургическое лечение с применением транспедикулярной фиксации и спондилодеза эффективно, если дегенеративный стеноз позвоночного канала сочетается с нестабильностью сегмента или он обусловлен нестабильным спондилолистезом (истмическим или дегенеративным) [13, 138, 139, 214, 276]. Частота дегенеративного спондилолистеза зависит от пола и возраста и редко выявляется у пациентов младше 50 лет. В группе населения старше 50 лет, частота этой патологии составляет 25,0% у женщин и 19,0% у мужчин [188]. В настоящее время доказаны преимущества оперативного лечения дегенеративного спондилолистеза по сравнению с консервативным лечением, но доказательная база недостаточна для формирования рекомендаций для лечения этой патологии [276].

Частота высокоэнергетических травматических повреждений поясничного отдела позвоночника и грудопоясничного перехода составляет 6,9% ($\pm 3,8$, 95,0% CI) от всех случаев высокоэнергетической тупой травмы, из общего количества частота осложненных повреждений составляет 26,6% ($\pm 10,7$, 95,0% CI) [177]. Для

классификации травматических повреждений поясничного отдела позвоночника принята классификация АО, которая используется, в том числе и для принятия решения о предпочтительном методе лечения [31, 315]. Известно, что переломы А1 и А2 типов являются стабильными и не требуют оперативного лечения. Переломы типа А3, А4 считаются условно стабильными и могут лечиться консервативно при отсутствии неврологического дефицита, обусловленного компрессией спинного мозга и корешков, и если нет значительного кифоза и коллапса тела позвонка; частота таких повреждений составляет 39,5% ($\pm 16,3$) от всех наблюдений [111, 177, 199, 263, 324]. Во всех случаях дистракционных и трансляционных повреждений типа В и С независимо от наличия неврологической симптоматики необходимо оперативное лечение [324]. Частота таких повреждений составляет 6,9% ($\pm 3,5$) и 14,2% ($\pm 8,1$) всех наблюдений для повреждений типа В и С соответственно [177].

Вместе с увеличением пропорции населения пожилого возраста увеличивается и частота такого патологического состояния, как остеопороз позвоночника. Вследствие остеопороза происходит снижение содержания кальция в костной ткани и плотности трабекул, что в итоге приводит к увеличению частоты низкоэнергетической травмы позвоночника за счет снижения механической прочности. В среднем частота низкоэнергетических переломов составляет 40,0% у женщин и 13,0% у мужчин старше 50 лет. Только в США ежегодно отмечается около 1,5 миллионов низкоэнергетических переломов, среди которых 50,0% приходится на переломы позвонков [220]. Из всех типов низкоэнергетических переломов повреждения OF4 и OF5 требуют оперативного лечения. Как правило, переломы позвонков, обусловленные остеопорозом стабильны и не требуют оперативного лечения, но у 15,0 – 35,0% в дальнейшем отмечается прогрессирование кифотической деформации, снижение жизненной емкости легких, хронический болевой синдром, также возможно развитие неврологического дефицита [220].

Подводя итоги, можно сделать вывод о значительной частоте патологии, требующей применения декомпрессии и стабилизации по причине дегенеративного или посттравматического стеноза

позвоночного канала в сочетании с нестабильностью сегментов, причем значительную часть, если не большинство, будут составлять пациенты старше 50 лет. С увеличением пропорции населения пожилого возраста количество оперативных вмешательств по поводу дегенеративного и посттравматического стеноза позвоночного канала будет ежегодно возрастать.

1.2 Проблема оценки качества костной ткани в клинической практике и ограничения при прогнозировании развития нестабильности имплантатов

Нарушение плотности костной ткани негативным образом влияет на результаты хирургического лечения заболеваний позвоночника, являясь причиной дестабилизации имплантатов и псевдоартроза [86]. В настоящее время доказано, что в основе расшатывания винтов лежит циклическая краниокаудальная и ротационная нагрузка на винты, которая приводит к их микроподвижности в костной ткани и повышенной нагрузке в области контакта с ней [66, 74]. У пациентов с остеопорозом резистентность костной ткани к такой нагрузке существенно меньше, это приводит к ее повреждению и ремоделированию. В итоге, это приводит к большой частоте расшатывания фиксатора у пациентов с нарушением плотности костной ткани, которая может достигать 60,0%, в то время как у больных без нарушения плотности костной ткани частота этого осложнения достигает 15,0% [146, 265]. В настоящее время опубликовано, что псевдоартроз может развиваться у 10,0 – 40,0% пациентов, оперируемых с применением транспедикулярной фиксации и межтелового спондилодеза, и частота этого осложнения также коррелирует с качеством костной ткани [296, 316]. Приведенные научные данные подчеркивают необходимость оценки факторов риска для прогнозирования расшатывания имплантатов и развития псевдоартроза, поскольку очевиден негативный экономический и социальный эффект, обусловленный значительной частотой осложнения [46, 128].

По вышеуказанным причинам многие исследователи ассоциируют развитие имплантатзависимых осложнений с таким патологическим состоянием, как остеопороз. По определению ВОЗ, системное заболевание скелета,

характеризующееся снижением плотности костной ткани и нарушением микроархитектоники кости с последующим повышением ее хрупкости и учащением риска переломов, называется остеопорозом [126]. Диагноз остеопороза основан на оценке Т-критерия или Z-критерия, которые, по сути, показывают на сколько квадратичных отклонений отличается плотность костной ткани. Т-критерий равен количеству среднеквадратичных отклонений от среднего значения плотности костной ткани молодых здоровых людей, а Z-критерий – количеству среднеквадратичных отклонений от среднего значения плотности костной ткани в группе пациентов соответствующего пола и возраста [30, 75, 126, 176, 301]. Соответствующие параметры определяются методом двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии. Как правило, термин остеопороз рассматривается в контексте оценки риска низкоэнергетических патологических переломов, но также есть многочисленные попытки экстраполировать его на оценку риска дестабилизации имплантатов [152, 247, 290, 312, 333]. Даже при оценке риска переломов выявлено, что методы, основанные на денситометрии, имеют высокую специфичность и низкую чувствительность, что потребовало ввести дополнительный критерий остеопороза – диагностированный низкоэнергетический перелом [109, 126]. Оказалось, что при оценке риска низкоэнергетического перелома помимо плотности костной ткани необходимо учитывать и множество других факторов, что в итоге привело к разработке систем оценки риска низкоэнергетических переломов, одной из которых является FRAX (a fracture risk assessment tool, англ.) [30, 223]. В настоящее время разработан дополнительный критерий для оценки качества костной ткани – плотность трабекул. Этот критерий является независимым от системы оценки риска FRAX фактором, который необходимо учитывать при оценке риска возникновения низкоэнергетических переломов [143, 287, 323]. Оценка плотности трабекул является сравнительно новым аналитическим инструментом, и в настоящее время обсуждается необходимость коррекции системы оценки риска низкоэнергетических переломов с учетом вновь разработанного критерия [28]. С большой вероятностью при оценке риска дестабилизации имплантатов, также

требуется анализ множества дополнительных факторов, как связанных с особенностями пациента, так и техникой оперативного вмешательства и особенностью имплантатов, что может дополнительно затруднить построение прогностических моделей.

Другой проблемой, ассоциированной с оценкой качества костной ткани, является невысокая точность остеоденситометрии, которая объясняет низкую чувствительность метода в отношении риска низкоэнергетических переломов. Денситометрия представляет собой суммационную оценку плотности костной ткани, включающую такие структуры, как дугоотростчатые суставы, ножки позвонков. Опубликованы данные, что на результаты оценки плотности костной ткани методом денситометрии могут влиять даже кальцификаты в аорте [41, 102, 257, 335]. Иначе говоря, результаты денситометрии могут завышать плотность костной ткани. Другим методом, который можно применять для оценки качества костной ткани, является количественная томография, которая имеет преимущества по сравнению с денситометрией, поскольку во время этого исследования можно оценить свойства костной ткани тел позвонков, исключив влияние гипертрофических изменений в суставах [126]. Следует отметить, что применение каждого дополнительного исследования увеличивает стоимость лечения и лучевую нагрузку, вследствие чего безопасность диагностической тактики с применением дублирующих исследований подвергается сомнению [72, 91, 172, 291]. В качестве альтернативы вышеуказанным способам оценки свойств костной ткани существует дополнительная возможность с использованием результатов КТ, которая часто применяется для предоперационного обследования пациентов как с травматической, так и с дегенеративной патологией позвоночника. В этом случае применяется измерение радиоденсивности костной ткани в единицах Хаунсфилда (HU или Hounsfield Unit, англ.). Как и предыдущие, этот метод также основан на оценке ослабления рентгеновских лучей разными тканями человека и представляет собой относительную плотность, калиброванную по проницаемости воздуха (-1000 HU) и воды (0 HU) [210]. Считается, что методика не калибрована для диагностики остеопороза, но так ли важно верифицировать этот диагноз для оценки риска

дестабилизации имплантатов? Изначально термин остеопороз внедрен для выявления пациентов с высоким риском энергетических переломов и остается открытым вопрос, можно ли экстраполировать полученные знания для прогнозирования имплантатзависимых осложнений.

Оценка качества костной ткани на основе радиоденсивности для прогнозирования риска имплантатзависимых осложнений в настоящее время имеет достаточное теоретическое обоснование. Доказано, что наблюдается сильная корреляция между радиоденсивностью и плотностью кальция костной ткани. Точность определения плотности кальция зависит от параметров компьютерного томографа и оптимальными характеристиками является применение 12 кВ рентгеновской трубки. В этом случае коэффициент детерминации (r^2) радиоденсивности и плотности кальция достигает 0,92 [71, 72]. Следовательно, полученное автором регрессионное уравнение может применяться для конвертации радиоденсивности в плотность кальция в костной ткани. В настоящее время доказано, что прочность фиксации транспедикулярных винтов в костной ткани коррелирует с плотностью кальция [112, 154, 160, 165, 187, 321]. Данные исследований показывают, что вероятность расшатывания их высока при плотности кальция менее 90 мг/см³ [154]. Также опубликованы данные биомеханических исследований, свидетельствующих о том, что при усталостных тестах с применением транспедикулярных винтов в условиях минеральной плотности менее 80 мг/см³ достигается только 60,0% резистентность к нагрузке по сравнению с образцами, соответствующими минеральной плотностью более 120 мг/см³ [165, 321]. Учитывая сильную корреляционную связь данных радиоденсивности с плотностью костной ткани, предполагается, что радиоденсивность может быть использована для оценки механических свойств костной ткани. Тем не менее, нередко эффективность такой оценки свойств костной ткани подвергается сомнению. Опубликованные работы основаны на оценке чувствительности и специфичности данных радиоденсивности КТ по отношению к выявлению пациентов со значением Т-критерия менее 2,5 по результатам остеоденситометрии [216, 217, 218, 219]. Научная методология таких

исследований вызывает вопросы, поскольку изначально за эталон взят менее точный метод денситометрии, являющийся суммацией поглощения рентгеновского излучения телами позвонков, ножками и дугоотростчатыми суставами, причем характеристики последних не имеют отношения к опороспособности тела позвонка. КТ исследование является волюметрическим и может предоставить данные о состоянии губчатого вещества тела позвонка, иначе говоря, этот метод имеет несопоставимо меньшую погрешность, чем остеоденситометрия. В итоге, авторы подобных публикаций пытаются по результатам более точного метода спрогнозировать результаты менее точной остеоденситометрии.

В настоящее время накоплены некоторые данные о применении радиоденсивности для прогнозирования результатов оперативных вмешательств с применением транспедикулярной фиксации и спондилодеза. По данным J. Mi и др. (2017), у пациентов с выявленной усадкой кейджа после выполнения TLIF радиоденсивность костной ткани тела позвонка была ниже, но исследование было ретроспективным и методика исследования малоприспособна для расчета пороговых прогностических значений [330]. Также исследована связь между радиоденсивностью в HU, частотой потери коррекции и усадкой имплантатов у пациентов с травматическими повреждениями области грудопоясничного перехода. Авторы разделили пациентов на три подгруппы – с костной плотностью губчатой ткани тел позвонков менее 110 HU, что соответствует остеопорозу, 110 – 180 HU, что соответствует остеопении и выше 180 HU, что соответствует норме по данным В. J. Schwaiger (2014) и Р. J. Picardt (2011) [72, 288]. В итоге, по данным исследования выявлено, что в группах с остеопенией и остеопорозом статистически значимо больше частота усадки межтелового имплантата и потери коррекции [148, 294].

Еще больше накоплен материал по применению радиоденсивности для прогнозирования расшатывания транспедикулярных винтов. В ретроспективном исследовании J. Bredow и др. (2016) доказано, что у пациентов с признаками расшатывания транспедикулярных винтов имелись более низкие значения

радиоденсивности губчатой ткани тел позвонков. Автор предположил, что радиоденсивность 120 HU – критерий, который можно использовать для прогнозирования расшатывания транспедикулярных винтов [246]. В. J. Schwaiger и др. (2014) выполнили ретроспективное исследование, в ходе которого применяли как компьютерную томографию с определением радиоденсивности в HU, так и количественную компьютерную томографию с определением минеральной плотности костной ткани. По данным исследования, минеральная плотность 92,0 мг/мл, соответствующая радиоденсивности 117,9 HU, если применялась 120 кВ рентгеновская трубка, обладала оптимальными операционными характеристиками для прогнозирования расшатывания винтов. Чувствительность дискриминантной функции, основанной на установленном прогностическом значении, составила 0,8, а специфичность 0,79; при выполнении ROC-анализа – площадь под кривой составила 0,827 [72]. В последующем было опубликовано ещё несколько работ, по результатам которых частота расшатывания транспедикулярного фиксатора зависела от радиоденсивности костной ткани тела позвонка [43, 146 147]. Таким образом, опубликованные данные свидетельствуют о том, что радиоденсивность может применяться для оценки свойств костной ткани.

Изучение причин и разработка мер профилактики имплантатзависимых осложнений затруднена в связи с отсутствием унифицированной методологии проведения научных исследований [231]. В отношении распространенности дестабилизации транспедикулярного фиксатора обращает на себя чрезвычайная вариабельность опубликованных данных, поскольку частота осложнения варьирует от 0 до 60,0% [231]. Причиной столь неоднозначных результатов является неоднородность дизайна исследований. Также известно, что многие врачи не выполняют КТ в обязательном порядке в послеоперационном периоде, применяя это исследование только если заподозрено расшатывание имплантатов [231]. Некоторые исследователи проводят контроль стабильности инструментированных сегментов, применяя только рентгенографию позвоночника, в то время как наиболее информативными признаками, свидетельствующими о расшатывании имплантатов, являются рентгенпрозрачная область вокруг винтов более 1 мм и так

называемый double halo sign [231]. Первый критерий – количественный, поэтому может иметь межэкспертную несогласованность. Вторым признаком – качественным с улучшенной межэкспертной согласованностью, но он используется реже [168]. Если КТ используется регулярно у всех пациентов, которым выполнялась транспедикулярная фиксация, то при таком дизайне исследования частота расшатывания может оказаться больше, чем в тех случаях, когда КТ выполняется только при клинических данных за расшатывание имплантатов [231]. Если при наблюдении в послеоперационном периоде используется рентгенография позвоночника без выполнения КТ, то частота расшатывания фиксатора тоже может оказаться меньшей по причине того, что по чувствительности этот метод диагностики уступает КТ [232]. При сравнении эффективности КТ, МРТ и рентгенографии позвоночника для выявления расшатывания винтов, наилучшими операционными характеристиками обладали данные КТ; чувствительность составляла 64,0 – 64,8%, специфичность 96,7 – 100,0% [232, 314]. В ходе работ, посвященных данной проблеме, сопоставлялись результаты исследований и данные, полученные при ревизионных вмешательствах у пациентов, которым ранее выполнялась транспедикулярная фиксация (расшатывание винтов диагностировалось на основании уменьшения торсионной силы, необходимой для удаления винта). Несмотря на то, что данные КТ обладают высокой специфичностью в отношении диагностики расшатывания винтов, клиническая значимость выявленного осложнения остается неоднозначной, поскольку у многих пациентов с КТ-признаками нестабильности фиксатора полностью отсутствует симптоматика [231]. Дополнительная трудность оценки результатов лечения пациентов с патологией позвоночника обусловлена субъективностью болевых ощущений, что требует применения шкал для оценки интенсивности боли и ограничения жизнедеятельности. В каждом конкретном случае ухудшения состояния необходим тщательный анализ, поскольку причина увеличения интенсивности боли может быть не связанной с ранее выполненной операцией [34]. В итоге, частота ревизионных вмешательств по причине расшатывания транспедикулярного фиксатора варьирует 0,6 – 17,0% наблюдений, что не

согласуется с частотой осложнения по данным КТ [253].

Учитывая количество ежегодно выполняемых операций с применением транспедикулярной фиксации и межтелового спондилодеза, негативные эффекты, обусловленные дестабилизацией имплантатов очевидны даже при невысокой частоте ревизионных вмешательств. Изучение проблемы затруднено из-за отсутствия стандартных подходов к выполнению биомеханических экспериментов и оценке клинических результатов. По этой причине в ходе выполнения исследования необходимо использовать объективные критерии расшатывания имплантатов по данным КТ, сопоставляя их значимость с клиническими данными. Кроме того, известны исследования, доказывающие, что свойства имплантатов и хирургическая тактика не менее значимо влияют на стабильность инструментации, чем плотность костной ткани. Таким образом, построение модели прогнозирования расшатывания имплантатов только на основе свойств костной ткани может оказаться необоснованным редукционизмом.

1.3 Факторы, влияющие на результаты хирургического лечения пациентов с дегенеративным и посттравматическим стенозом позвоночного канала

1.3.1 Особенности хирургической техники, влияющие на результаты оперативных вмешательств по поводу дегенеративного стеноза на фоне нестабильности сегмента

Прогнозирование развития нестабильности может оказаться более сложной задачей, поскольку помимо свойств костной ткани, частота этого осложнения может зависеть от множества других факторов, таких как протяженность фиксации, люмбосакральная фиксация, биомеханические нарушения и тип спондилодеза [6, 18, 20, 73, 84, 227, 307]. Не исключаются эффекты второго и третьего порядка, которые можно изучить только на большой выборке пациентов. В настоящее время опубликованы данные, которые прямым или косвенным способом свидетельствуют о том, что частота дестабилизации фиксатора возрастает с увеличением протяженности фиксации [11]. Такой эффект обусловлен

тем, что увеличивается длина рычага силы, воздействующей на крайние точки металлоконструкции [19]. Именно поэтому, как правило, наиболее часто расшатываются винты краниальной или каудальной крайней точки фиксации [184, 207, 227, 307]. Считается, что дополнительным фактором риска, увеличивающим вероятность дестабилизации транспедикулярных винтов, является люмбосакральная фиксация [26]. Анатомическими и биомеханическими предпосылками являются короткие ножки крестца, диаметр которых значительно больше, чем у поясничных позвонков. Зона для проведения винтов, как правило, проходит через область крестца с низкой костной плотностью. Это является причинами слабости фиксации винта в крестце. Кроме того, сегмент L5–S1 является переходной зоной, что дополнительно повышает нагрузку на винты [2, 10, 54, 227, 307].

Наименее изученным фактором, который может потенциально повлиять на стабильность фиксации, является резекция структур задней опорной колонны. Известно, что ламинэктомия в сочетании с экстенсивной резекцией дугоотростчатых суставов значительно увеличивает объем движений позвоночно-двигательного сегмента [119, 182, 289]. Ламинэктомия увеличивает подвижность при движениях в сагиттальной плоскости (наклон вперед – назад) в то время, как резекция дугоотростчатых суставов приводит к увеличению объема движений при ротации [182, 289]. Значимость резекции различных структур заднего опорного комплекса может отличаться. В эксперименте одноуровневая ламинэктомия не приводила к значительной дестабилизации оперированного сегмента в то время, как двухсторонняя фасетэктомия приводила к увеличению объема движений в 3 раза [119, 289]. Учитывая результаты биомеханических тестов, можно предположить, что резекция заднего опорно-связочного комплекса способна привести к увеличению нагрузки на винты и повышению частоты их расшатывания. Также вероятно, что экстенсивная резекция дуги позвонка и дугоотростчатых суставов сделает невозможным формирование заднего резервного костного блока. У пациентов с остеопорозом формирование переднего костного блока (межтеловой спондилодез) зависит от костной плотности тел

позвонков, замедляясь при нарушении плотности костной ткани. Формирование заднего костного блока происходит независимо от костной плотности тел позвонков, что может иметь существенное значение у этой группы пациентов [1]. Биомеханический эффект неполной редукции позвонка на стабильность фиксации практически не обсуждается в литературе и даже есть данные, что клинический результат хирургического лечения при 1 и 2 степени спондилолистеза не коррелирует с полнотой редукции позвонка [171]. Тем не менее, доказано, что биомеханические нарушения с неоптимальными параметрами позвоночно-тазовых соотношений могут приводить к дестабилизации транспедикулярного фиксатора [227, 307].

Опубликованы данные, что межтеловой спондилодез увеличивает стабильность фиксации, уменьшая частоту раннего расшатывания транспедикулярных винтов. По данным D. H. Kim и соавт. (2020), частота расшатывания винтов уменьшалась, если выполнялся трансфораминальный межтеловой спондилодез по сравнению с наблюдениями, когда выполнялся только задний спондилодез [92]. С другой стороны, не опубликовано данных с достаточным доказательным уровнем о влиянии типа межтелового спондилодеза на частоту дестабилизации имплантатов в клинических испытаниях. В настоящее время в литературе встречаются только результаты биомеханических тестов, которые не лишены противоречий [155, 190]. По итогам некоторых исследований не выявлено биомеханических преимуществ спондилодезов ALIF и DLIF по сравнению с трансфораминальным межтеловым спондилодезом. С другой стороны, результаты большинства опубликованных работ свидетельствуют о том, что межтеловой спондилодез с применением кейджа широкой площади опоры приводит к оптимальному распределению нагрузки, в том числе за счет периферической части тел позвонков, уменьшая нагрузку на винты [36, 49, 125, 130, 186, 283, 311]. Принимая во внимание неоднозначность результатов биомеханических исследований, необходима оценка их клинической значимости.

Прочность фиксации винтов в позвонках также зависит от применяемой техники их установки. Известно, что прочность фиксации транспедикулярных

винтов на 60,0% обеспечивается ножкой позвонка. Доказано, что значительный биомеханический эффект достигается, если винт вводится, как минимум на 80,0% глубины тела позвонка. Прочность фиксации винта в костной ткани возрастает на 32,5%, если винт вводится до 80,0% глубины тела позвонка по сравнению с установкой на глубину 50,0% [202]. При конвергенции винтов 30° достигается дополнительное увеличение резистентности на вырывание на 26,8% [202]. Указанные биомеханические эффекты нивелируются у пациентов с нарушением плотности костной ткани. У таких пациентов только бикортикальное введение винтов дает дополнительное повышение устойчивости на вырывание на 20,0 – 25,0%, но повышает риск повреждения магистральных сосудов [32, 62]. С другой стороны, остеопороз может ослабить кортикальный слой тела позвонка, что снижает эффективность бикортикальной фиксации, особенно на уровне крестца [303]. Смещение точки опоры винта в вентральном направлении также имеет негативные последствия: в этом случае отмечается так называемый «эффект очистителя лобового стекла», что приводит к дестабилизации винта в ножке позвонка [106]. Мальпозиция в виде латерализации винта с пенетрацией наружного кортикала тела позвонка уменьшает прочность фиксации на 21,0% [202]. Смещение винта медиально с пенетрацией ножки позвонка опасно неврологическими осложнениями, но увеличивает прочность фиксации на 8,0% [202]. Перепроведение транспедикулярных винтов, установленных по субоптимальной траектории, также значительно ослабляет их фиксацию в костной ткани [32, 202, 306]. При операциях у пациентов с нарушением плотности костной ткани может иметь значение то, как подготавливается отверстие для ввода винта и как проводится нарезка резьбы. Известно, что формирование отверстия недостаточного диаметра приводит к необходимости применять избыточное усилие, что может привести к перелому ножек позвонка, с другой стороны, отверстие с избыточным диаметром ослабляет фиксацию винта в костной ткани [106]. Для обеспечения максимальной прочности фиксации винта в костной ткани рекомендуется формировать отверстие диаметром 50,0 – 71,5% от диаметра винта, а нарезку резьбы проводить метчиком диаметром на 2 мм меньше, чем у винта [252,

305]. Привлекает также дизайн винта с возможностью самонарезания резьбы, но предполагается, что сила трения при его введении приведет к необходимости применять повышенное усилие, что может быть причиной перелома ножки позвонка [305]. Результаты биомеханических тестов самонарезающихся винтов остаются противоречивыми. По данным F. M. Pfeiffer (2006) и L. H. Chen (2009), предварительная нарезка резьбы негативно сказывалась на стабильности транспедикулярного винта [239, 254]. С другой стороны, опубликованы данные, что такого эффекта не наблюдается при установке винтов на уровне грудного отдела позвоночника [122]. По результатам некоторых исследований не выявлено статистически значимых отличий прочности фиксации в костной ткани винтов без предварительной нарезки резьбы и с предварительной ее нарезкой [52]. Опубликованные данные клинических и биомеханических исследований свидетельствуют о том, что хирургическая техника значительно влияет на результаты транспедикулярной фиксации, следовательно, необходима разработка дифференцированной тактики с обоснованием объема декомпрессии, протяженности транспедикулярной фиксации и типа спондилодеза, что особенно важно у пациентов с нарушением плотности костной ткани.

1.3.2 Влияние дизайна винта на прочность транспедикулярной фиксации

Предполагается, что дизайн винта особенно важен, если выполняется оперативное вмешательство у пациентов с остеопорозом позвоночника. Наиболее часто используется следующее техническое решение: применение винтов максимального диаметра увеличивает прочность фиксации, но диаметр винта ограничен размером ножки [106]. Проблемой применения винтов у пациентов с нарушением плотности костной ткани является как снижение ее механических свойств, так и ограничение возможности применения максимального возможного диаметра винта в связи с риском перелома ножек позвонка по причине того, что нарушаются механические свойства в том числе и кортикального слоя [106]. В связи с нарушением плотности костной ткани ножки позвонка различными авторами неоднократно отмечен значительный риск ее перелома, если

используется такая стратегия увеличения прочности фиксации [81, 105, 106, 201].

Дополнительно повысить стабильность фиксации можно, увеличив площадь контакта винта и костной ткани, что осуществимо за счет увеличения глубины резьбы [81]. Это достижимо только за счет уменьшения внутреннего диаметра винта. Ограничением такого подхода является необходимость сохранить достаточную механическую прочность винта. Дополнительно площадь контакта винта и костной ткани можно увеличить за счет уменьшения шага резьбы винта, что в итоге дополнительно увеличит его стабильность в костной ткани [95, 105, 106]. С другой стороны, опубликованы результаты биомеханических тестов, по результатам которых уменьшение винтового шага резьбы может снизить резистентность к вырыванию [106, 162]. Указанные противоречия объясняются тем, что при уменьшении винтового шага резьбы прочность фиксации будет увеличиваться до тех пор, пока это не будет вызывать деструкцию костной ткани [106, 162].

Геометрия винта также может оказать значимое влияние на прочность фиксации. Наиболее изучена биомеханика применения конических винтов. Биомеханический эффект их применения обусловлен тем, что при введении данных винтов происходит дополнительная компрессия окружающей костной ткани [95, 106, 157]. Такой дизайн имеет и недостатки: прочность фиксации может существенно уменьшиться, если требуется вывернуть винт даже на один шаг резьбы [256]. Также опубликованы данные, что при коническом дизайне винта значительно увеличивается резистентность на вырывание по сравнению с цилиндрическими винтами [57, 80, 157]. С другой стороны, при тестировании конических и цилиндрических винтов в условиях остеопороза, не выявлено статистически значимых отличий в отношении резистентности к силам на вырывание [256]. По результатам Y. Y. Kim (2012), наибольшей прочностью фиксации обладали винты с коническим сердечником и цилиндрической резьбой. Винты с таким дизайном обладали на 23,0 – 37,0% большей резистентностью по отношению к силам на вырывание по сравнению с цилиндрическими винтами и на 10,0 – 21,0% большей резистентностью по сравнению с коническими винтами

[179]. С точки зрения конструирования, при работе с относительно мягкими материалами оптимальными являются винты с более широким шагом резьбы и большей ее глубиной. Если есть ограничение по максимальному диаметру имплантата, то предпочтительно применение винтов с меньшей глубиной резьбы и с меньшим ее шагом [106].

Дополнительные изменения, такие как использование двух типов резьбы, или добавление параллельно основной дополнительной резьбы меньшей высоты не привело к значимому эффекту [226]. Применение двухзаходной резьбы одинаковой высоты позволяло увеличить стабильность транспедикулярных винтов [226]. Дополнительным параметром винтов, который считалось, что может повлиять на их стабильность, являлся тип резьбы. Наиболее часто применяющийся тип резьбы – метрическая, или V-образная, поверхность которой находится под углом 120° к оси винта. Упорный и прямоугольный типы резьбы чаще применяются в машиностроении и более оптимальны для того, чтобы трансформировать вращательное движение в линейное [106]. Предполагалось, что этот тип резьбы может иметь преимущество по сравнению с метрической за счет того, что ее поверхность находится под углом, близким к 90° относительно оси винта, что могло повысить прочность на вырывание, но ожидания не оправдались. В ходе биомеханических тестов было выявлено, что прочность на вырывание у цилиндрических винтов с метрической резьбой была на 16,3% больше, чем у соответствующих винтов с прямоугольной резьбой, и на 13,4% больше, чем у винтов с упорной резьбой [179].

Одним из источников ранее указанных противоречий являются тиражирующиеся в печатных изданиях заблуждения, что силу фиксации винтов обеспечивает кортикальный слой ножек позвонков в то время, как толщина этих образований существенно больше, чем диаметр наиболее часто используемых винтов [226]. Как результат – винты часто не опираются на кортикальный слой, и находятся в губчатой кости. Возможно, это объясняет, почему винты со смешанным типом резьбы обладают худшими биомеханическими характеристиками, чем те, которые имеют двойную резьбу, поскольку такой дизайн

разработан, основываясь на предположении, что винты опираются на кортикальный слой ножки позвонка [9, 25, 226]. Учитывая имеющиеся противоречия, необходимо в клинических исследованиях оценить значимость параметров транспедикулярных винтов для стабильности фиксации.

1.3.3 Применение не прямой декомпрессии в хирургии дегенеративных заболеваний позвоночника

Дегенеративный стеноз позвоночного канала на уровне поясничного отдела позвоночника является одним из наиболее распространенных дегенеративных заболеваний, частота которого составляет 11,0 – 38,0 % [250]. Морфологически это заболевание характеризуется снижением высоты диска, гипертрофией дугоотростчатых суставов и желтой связки, формированием краевых остеофитов, что приводит к сужению позвоночного канала. Это является обязательным, но недостаточным условием для проявления клинических симптомов: степень сужения должна быть такой, чтобы она нарушала функцию невральных структур и сосудов [78]. Указанные патологические процессы приводят к прогрессирующему болевому синдрому в пояснице, клинике радикулопатии или нейрогенной перемежающейся хромоты, что требует выполнения оперативных вмешательств при отсутствии эффекта от консервативного лечения. Тем не менее, известно, что стеноз позвоночного канала также имеет и динамический компонент, который зависит от физической нагрузки и положения [79, 192]. Известно, что при разгибании и аксиальной нагрузке уменьшаются резервные пространства позвоночного канала, этот эффект значительно увеличивается, если имеются дегенеративные изменения позвоночника, сужающие позвоночный канал [113, 225, 237].

Для диагностики дегенеративного стеноза позвоночного канала чаще всего применяется МР-томография, поскольку она обеспечивает хорошее контрастирование невральных структур и позволяет оценить их соотношение с другими структурами позвоночно-двигательного сегмента [48, 99, 108]. С другой стороны, при диагностике дегенеративного стеноза позвоночного канала может

быть необходима КТ для уточнения локализации остеофитов и характера компримирующего субстрата, это особенно важно, если планируется применение фиксации со спондилодезом [133, 141, 209]. КТ позволяет лучше оценить наличие остеофитов, костные размеры канала, также позволяет четче визуализировать задние структуры, в частности, дегенеративные изменения дугоотростчатых суставов и спондилолиз [133]. Также опубликованы исследования, свидетельствующие, что данные МРТ в отношении диагностики дегенеративного стеноза позвоночного канала не имеют преимуществ по сравнению с результатами КТ, поскольку последний метод обладает большей чувствительностью в отношении данной патологии [107, 209]. Более высокую чувствительность КТ можно объяснить тем, что она позволяет более четко дифференцировать желтую связку и остеофиты у пациентов с дегенеративными заболеваниями позвоночника [213]. При отсутствии значимых дегенеративных изменений желтая связка имеет более интенсивный сигнал, что обусловлено высоким содержанием эластина (80,0 %) и низким содержанием коллагена 1 типа (20,0 %) [213]. Это позволяет легко дифференцировать ее от костной ткани. При прогрессировании дегенеративных изменений происходит фиброзирование желтой связки, что изменяет интенсивность сигнала от данной структуры. В итоге, при МР-последовательности SE 600-800/20 TR/TE затруднена дифференцировка кортикальной костной ткани от прилежащего фиброза, а при длинном интервале времени повторения TR и короткой эхо-задержкой TE (SE 2500-3000/20) сигнал от желтой связки не может быть четко отдифференцирован от сигнала спинномозговой жидкости [189, 213].

По вышеуказанным причинам данные оценки параметров позвоночного канала, полученные в результате КТ исследования могут быть более точными.

Хирургическая тактика при стенозе позвоночного канала на основе его параметров не разработана до настоящего времени, тем не менее, некоторые пороговые значения предложены в качестве критерия диагноза. В настоящее время считается, что площадь сечения позвоночного канала менее 100 мм² является признаком относительного стеноза позвоночного канала, а площадь менее 75 мм² – признаком абсолютного стеноза позвоночного канала [101, 194, 215, 279].

Критерием латерального стеноза позвоночного канала являются высота бокового канала менее 2 мм, глубина бокового канала менее 3 мм и угол бокового канала менее 30° [101, 279]. С другой стороны, не опубликовано данных, подтверждающих, что эти пороговые значения могут использоваться для выбора хирургической тактики при данной патологии. В настоящее время предложено множество хирургических техник для выполнения декомпрессии корешков и стабилизации сегментов позвоночного столба у пациентов с дегенеративной патологией позвоночника. Одной из современных тенденций является постепенное возрастание популярности спондилодеза из вентрального доступа. Интерес к данным методам обусловлен тем, что реконструкция вентральной колонны позволяет выполнить коррекцию баланса, кроме того, кейдж с широкой площадью опоры позволяет увеличить стабильность конструкции. Дополнительный эффект, который достигается за счет реконструкции передней опорной колонны – это непрямая декомпрессия корешков спинного мозга. Методика непрямой декомпрессии имеет ряд преимуществ по сравнению с микрохирургическим вмешательством: в ходе операции не выполняется непосредственное вмешательство на корешках и спинном мозге, что уменьшает вероятность их повреждения, отсутствует риск развития рубцово-спаечной болезни с развитием хронического болевого синдрома. Кроме того, методика позволяет сохранить структуры заднего опорного комплекса, что может быть необходимым для формирования резервного заднего блока, а это особенно важно у пациентов с остеопорозом позвоночника [1, 14]. Эффект непрямой декомпрессии достигается за счет восстановления высоты межпозвонкового промежутка, в результате чего натягиваются задняя продольная и желтая связки, что в итоге приводит к увеличению площади поперечного сечения позвоночного канала [97, 116, 245]. По результатам ранее опубликованного исследования, увеличение площади сечения ТМО коррелировало с уменьшением толщины желтой связки и увеличением высоты межпозвонкового промежутка, в то же время статистически значимой корреляции с уменьшением степени пролабирования диска не выявлено [116]. В настоящее время наиболее точно

изучены результаты не прямой декомпрессии корешков спинного мозга при фораминальном стенозе позвоночного канала. За счет восстановления высоты диска удается увеличить площадь форамины на 8,0 – 60,0 % (в среднем на 36,0 %), а ее высоту на 6,0 – 65,0 % (в среднем на 30,0 %) [245]. При фораминальном стенозе позвоночного канала не прямая декомпрессия с восстановлением межпозвонкового промежутка может быть более эффективной, чем микрохирургическая декомпрессия с трансфораминальным спондилодезом [38, 260, 327]. Неоднозначны оценки результатов не прямой декомпрессии при центральном стенозе позвоночного канала, поскольку диапазон изменения площади его сечения после выполнения операции находился в пределах 7,0 – 143,0 % от исходного [127, 159, 170, 245, 248, 309]. При выполнении регрессионного анализа выявлена зависимость приращения площади позвоночного канала, получено уравнение:

$$Y=3,94X + 12,31 (1),$$

где Y – разница между площадью поперечного канала до и после операции; X – увеличение высоты диска [180].

Еще меньше работ посвящено эффективности не прямой декомпрессии при латеральном стенозе позвоночного канала. По результатам опубликованных исследований глубина бокового канала после не прямой декомпрессии может увеличиться на 46 % от исходной величины [29]. Безусловно, такой эффект может быть достигнут не у всех пациентов, в связи с чем перспективно изучение корреляции данных КТ и МРТ с клинической картиной. Это необходимо для определения критических размеров позвоночного канала, которые позволяют достигнуть клинически значимого эффекта. С другой стороны, отмечено, что данные лучевой диагностики не полностью коррелируют с клиническими данными [101]. Слабой стороной исследований, направленных на изучение связи результатов лучевой диагностики и клинических данных, является то, что при выполнении исследования пациент находится в состоянии покоя – лежа и не учитывается возможный динамический компонент стеноза позвоночного канала. Известно, что при аксиальной нагрузке, нестабильности и при разгибании

уменьшаются резервные пространства позвоночного канала, и этот эффект увеличивается при выраженных дегенеративных изменениях ПДС [113, 225, 237]. Таким образом, основываться только на результатах нейровизуализации для прогнозирования результатов не прямой декомпрессии рискованно, так как возможно увеличение частоты неудовлетворительных результатов. Данные исследования К. Z. Lim (2019) свидетельствуют о том, что при отборе пациентов для выполнения не прямой декомпрессии необходимо принимать во внимание результаты клинических тестов. Если у пациента полностью регрессирует неврологическая симптоматика в положении лежа, это может свидетельствовать о значительном динамическом компоненте стеноза позвоночного канала, следовательно, стабилизация сегмента с не прямой декомпрессией позволит достигнуть клинически значимого результата [114]. С другой стороны, принятие решений только на основании клинических тестов тоже может оказаться не совсем точным, поскольку во время такого теста невозможна редукция позвонка, которая может обеспечить дополнительный эффект при не прямой декомпрессии. Применение такой методики отбора пациентов на оперативное вмешательство сделает его более строгим, сузив показания к применению обсуждаемой хирургической техники. В этом случае попытка повысить частоту хороших результатов может привести к побочному эффекту – снижению чувствительности алгоритма, применяемого для классификации наблюдений. Другими словами, не прямая декомпрессия будет применяться не во всех случаях, где она была бы эффективной, что может увеличить риски имплантатзависимых осложнений у пациентов с нарушением плотности костной ткани. О несовершенстве алгоритма отбора пациентов для выполнения не прямой декомпрессии свидетельствует значительная частота ревизионных вмешательств с применением микрохирургической декомпрессии. По данным опубликованных исследований, частота таких наблюдений может составлять в среднем 9,9 %, варьируя от 9,5 до 43,0 %. Большой разброс данных также демонстрирует необходимость более тщательного изучения проблемы и унификации отбора для применения не прямой декомпрессии [29, 85, 180, 309]. Среди факторов, которые могут негативно

повлиять на результат применения этой техники указаны анкилоз дугоотростчатых суставов и остеопороз [135]. Наличие у пациента остеопороза приводит к тому, что попытка увеличить высоту межпозвонкового промежутка ассоциируется с субхондральным повреждением кости и усадкой имплантов. В случае анкилоза дугоотростчатых суставов невозможна редукция позвонка при наличии спондилолистеза и может быть затруднена мобилизация и дистракция межпозвонкового промежутка [135]. Опубликованы данные, что у пациентов с исходным неврологическим дефицитом, обызвествлением задней продольной связки, краевыми остеофитами и экструзией диска очень высока вероятность неудовлетворительного результата не прямой декомпрессии [90, 116, 326]. Также отмечено, что пациенты со степенью D по Schizas не являются подходящими кандидатами для выполнения не прямой декомпрессии, и в большинстве случаев при такой степени дегенеративного стеноза потребуются микрохирургическая декомпрессия [261]. С другой стороны, наличие вакуум-феномена в диске свидетельствует о мобильности сегмента, что является благоприятным признаком, если планируется не прямая декомпрессия за счет восстановления межпозвонкового промежутка [121]. Результаты R. Navarro-Ramirez (2017) свидетельствуют о том, что выраженные дегенеративные изменения дугоотростчатых суставов и тропизм не влияют на результаты не прямой декомпрессии [211]. Очевидно, что результаты вышеперечисленных работ должны учитываться для оценки риска неудовлетворительного результата не прямой декомпрессии, вклад этих факторов целесообразно оценить в многомерной модели. В итоге, важна разработка методологии оценки связи между клиническими данными и результатами лучевой диагностики. Кроме того, необходима разработка методов прогнозирования результатов не прямой декомпрессии. Для решения первой задачи можно модифицировать ранее выполненное исследование по оценке корреляции данных КТ и клиники, поставив задачу дискриминации пациентов, у которых в покое в положении лежа отсутствует неврологическая симптоматика [7]. Это даст целевые значения размеров позвоночного канала, необходимых для достижения клинически значимого эффекта. Также необходимо прогнозирование

результатов непрямой декомпрессии, что дало бы возможность оценки, будут ли достигнуты критические значения параметров позвоночного канала, необходимые для достижения клинического эффекта.

1.3.4 Частные вопросы хирургической тактики при посттравматическом стенозе позвоночного канала на уровне поясничного отдела позвоночника и области грудопоясничного перехода

Наиболее часто переломы локализуются в области грудопоясничного перехода – Th10 – L2, это обусловлено биомеханическими особенностями, поскольку в данной области грудной ригидный отдел переходит в подвижный поясничный [198, 318, 338]. Несмотря на большое количество опубликованных работ, посвященных хирургическому лечению травматической патологии этой области, не выработан стандартизированный подход к этой проблеме [40]. До настоящего времени обсуждаются преимущества и недостатки короткой и длинной фиксации при травматических повреждениях переходной грудопоясничной зоны. Ранее опубликованные данные свидетельствуют о том, что короткая фиксация, включающая два сегмента, часто оказывается недостаточной для обеспечения стабильности этой области при наличии взрывного перелома. Подтверждением этому предположению являются биомеханические тесты, свидетельствующие о более эффективном ограничении движений при длинной фиксации, и наблюдающаяся при короткой фиксации большая частота потери коррекции и дестабилизации имплантатов [37, 51, 123, 299]. Данные большинства опубликованных исследований свидетельствуют, что прочность фиксации может быть значительно увеличена за счет выполнения промежуточной фиксации [58, 93, 123, 229, 285]. По мнению некоторых исследователей, промежуточная фиксация может оказать биомеханический эффект сопоставимый с этапным оперативным вмешательством, включающим транспедикулярную фиксацию с реконструкцией передней опорной колонны [58]. Опубликованы данные, подтверждающие, что промежуточная фиксация снижает частоту потери коррекции деформации и развития нестабильности фиксатора [131]. По результатам других, такая

хирургическая тактика не приводила к увеличению прочности транспедикулярной фиксации и не влияла на результаты оперативного лечения взрывных переломов переходной грудопоясничной области [58, 96]. Объяснением наблюдаемым противоречиям может быть неоднородность групп пациентов, на которых изучался эффект промежуточной фиксации. В группе пациентов, включенных в исследование, которым применялось данное техническое решение, которое не оказало значимого биомеханического эффекта и не влияло на отдаленные результаты, могли быть включены пациенты с более стабильными повреждениями [175].

Неоднозначными остаются сведения в отношении показаний к применению длинной фиксации, включающей 4 ПДС и короткой фиксации, включающей 2 ПДС. Результаты большинства исследований свидетельствуют о том, что длинная фиксация обладает большей прочностью по сравнению с короткой, в большей степени ограничивая объем движений поврежденного сегмента [37, 51, 123, 299]. С другой стороны, по данным М. J. Volesta и соавт. (2012), а также R. Basaran и соавт. (2019) короткая фиксация с установкой винтов в сломанный позвонок имела такую же стабильность, как длинная фиксация, и, по мнению автора, могла быть альтернативой длинной фиксации [132, 229]. Результаты клинического исследования М. Dorban (2016) также подтверждают полученные данные. В ходе исследования доказано, что по функциональным и рентгенологическим результатам длинная фиксация и короткая с применением промежуточной фиксации не отличаются [325].

До настоящего времени противоречива информация об эффективности реконструкции передней опорной колонны. По данным G. S. Gurwitz и соавт. (1993), результаты короткой фиксации без выполнения промежуточной фиксации уступают результатам аналогичного вмешательства с выполнением реконструкции передней опорной колонны, свидетельствуя о том, что реконструкция передней колонны необходима для предотвращения дестабилизации фиксации и потери коррекции [53]. По данным А. Sait и соавт. (2016) короткая фиксация с выполнением промежуточной фиксации по стабильности была сравнима с

оперативным вмешательством, включающим передний спондилодез и транспедикулярную фиксацию [58]. G. J. Xu (2013) сравнил результаты лечения пациентов, которым применялось только вмешательство из заднего доступа и тех, кому выполнялась транспедикулярная фиксация с реконструкцией передней опорной колонны. По результатам анализа не выявлено отличий функциональных и рентгенологических результатов в исследуемых группах пациентов [39, 308]. Еще в работе Т. McCormac и соавт. (1994) разработана тактика с применением межтелового спондилодеза на основании оценки потери опороспособности передней опорной колонны. Учитывая изложенное в этой работе, возможной причиной столь неоднородных результатов опубликованных исследований может быть применение межтелового спондилодеза как пациентам, которым он необходим для достижения результата, так и тем, кому его можно было бы не выполнять [203]. Несовершенство методологии ранее опубликованных работ обусловлено как неучтенными дополнительными факторами, влияющими на результат, так и противопоставлением различных технических решений, в то время как их совместное применение могло иметь суммационный эффект.

В опубликованных исследованиях не уделяется внимание потенциальному влиянию резекции различных структур ПДС при декомпрессии на результаты оперативного лечения пациентов с посттравматическим стенозом позвоночного канала. В настоящее время опубликованы данные, что при нестабильной трансляционной и дистракционной травме с повреждением связочного аппарата, а также при резекции ножки позвонка во время декомпрессии может потребоваться более протяженная фиксация или применение реконструкции вентральной колонны [175]. Как при этих видах травмы, так и при выполнении резекции опорно-связочного комплекса ПДС для выполнения декомпрессии происходит дестабилизация сегмента. Известно, что капсулы суставов, надостная и межостистая связки обеспечивают стабильность ПДС при ротации и при наклонах вперед и назад, ограничивая объем движений [182, 289]. Как при дегенеративной, так и при травматической патологии резекция структур заднего опорного комплекса потенциально может увеличить нагрузку на фиксатор. Кроме того, при

избыточной резекции задних структур может стать невозможным формирование заднего спондилодеза, который не зависит от состояния костной ткани тел позвонков [1]. Частным неразрешенным вопросом хирургического лечения травматической патологии поясничного отдела позвоночника и грудопоясничной области может быть влияние передней декомпрессии с резекцией тела позвонка на стабильность фиксации.

Наиболее противоречивой, по данным литературы, является информация об эффективности применения передней и задней декомпрессии при осложненной травме на уровне поясничного отдела позвоночника и грудопоясничного перехода [316]. Известно, что в большинстве случаев причиной неврологического дефицита является компрессия спинного мозга и корешков за счет смещения костных отломков тела позвонка в позвоночный канал. В связи с этим некоторые авторы считают, что передняя декомпрессия является наиболее эффективным методом, позволяющим обеспечить прямую визуализацию и устранить компрессию невралгических структур [316]. По мнению некоторых экспертов, задняя декомпрессия не устраняет переднюю компрессию, в то же время ослабляет заднюю опорную колонну, потенциально увеличивая нагрузку на имплантаты [54]. Негативный биомеханический эффект может оказаться наиболее значимым на уровне поясничного отдела позвоночника, где задние структуры несут 23,0% нагрузки на сегмент [320]. Дополнительным аргументом в пользу передней декомпрессии является возможность реконструкции передней колонны, что уменьшает частоту потери коррекции кифотической деформации в отдаленном периоде [243]. Накопленный материал по этому вопросу не разрешает имеющихся противоречий. В настоящее время становится очевидным, что не выявлено отличий эффективности передней и задней декомпрессии спинного мозга и корешков, поскольку частота восстановления неврологической функции у этих групп пациентов не отличалась значимо [39, 40, 316, 317]. По этой причине выбор метода декомпрессии производится на основании предпочтений и навыков оперирующего хирурга, а не по причине эффективности выбранного метода. Кроме того, опубликованы данные, что полнота коррекции кифотической деформации не

всегда коррелирует с качеством жизни и функциональным результатом [40]. В тоже время, по мнению большинства авторов, дополнительный этап оперативного лечения из переднего доступа удлиняет время операции, увеличивает её травматичность, интраоперационную кровопотерю и частоту осложнений [39, 40, 110, 317]. В итоге, применение оперативных вмешательств чаще основано только на мнении конкретного эксперта и лимитировано его практическими навыками.

Отсутствие дифференцированной тактики лечения травматической патологии позвоночника может приводить к таким негативным эффектам, как необоснованное расширение объема операции с увеличением ее травматичности и ресурсоемкости. С другой стороны, есть риск выполнения недостаточного объема операции, что в последствии приведет к потере коррекции и ранней дестабилизации имплантатов. В итоге, очевидна необходимость разработки дифференцированной тактики лечения травматических повреждений позвоночника с учетом качества костной ткани и оптимального применения хирургической техники, включающей протяженность фиксации, дифференцированный подход к выполнению декомпрессии и спондилодеза.

1.3.5 Противоречия, связанные с методами стабилизации с применением аугментации костной ткани

При прогрессировании нарушения плотности костной ткани до цифр, соответствующих остеопорозу, в значительной степени уменьшается количество костных трабекул, что приводит к снижению прочности фиксации винта в костной ткани. В этом случае решение за счет оптимизации дизайна винта не может решить проблему прочности фиксации в костной ткани, также стабильность винтов не зависит от их длины и становится неэффективным применение бикортикальной фиксации [106]. В основе расшатывания винтов у пациентов с остеопорозом лежит большая микроподвижность винтов, чем в нормальной костной ткани и, как следствие, прогрессирующий остеолит вокруг них [1, 44, 60, 106, 165, 297]. В настоящее время применяются следующие стратегии для увеличения прочности транспедикулярной фиксации: бикортикальная фиксация, применение

субламинарных крюков и лент, расширяющиеся винты, установка винтов по альтернативной траектории, увеличивающей контакт с кортикальной костью, оптимизация дизайна винтов и аугментация транспедикулярных винтов костным цементом [106]. По данным исследований, наиболее эффективным методом увеличения прочности транспедикулярной фиксации является аугментация костной ткани цементом [106, 297]. Эта технология часто применяется при вертебропластике и кифопластике; при выполнении этих вмешательств инъекция даже небольшого объема цемента восстанавливает опороспособность позвонка [60]. Наиболее часто для аугментации позвонков применяется костный цемент на основе полиметилметакрилата (ПММА), который в зависимости от метода введения цемента и его объема обеспечивает увеличение прочности фиксации винтов в биомеханических тестах на вырывание на 25,0 – 348,0% [44, 65, 106]. Именно благодаря выше указанным особенностям применение данной технологии считают предпочтительной у пациентов с остеопорозом [297]. Альтернативным вариантом является применение костного цемента на основе кальция фосфата, но такой метод аугментации уступает по прочности методике с применением ПММА [106].

При сравнении прочности фиксации винтов в тестах на вырывание, эффективность вертебропластической техники для аугментации была сопоставима с методикой, использующей инъекцию цемента через канюлированные фенестрированные винты, тем не менее, последняя обеспечивала большую стабильность при циклических краниокаудальных нагрузках [87, 161, 255]. По данным исследования D. Liu (2018), оптимальным является введение по 1,5 мл цемента на каждую точку фиксации при остеопорозе (Т-критерий менее $-2,5$), и по 3 мл цемента с каждой стороны при тяжелой степени остеопороза (Т-критерий менее $-3,5$) [56, 65]. С другой стороны, по результатам исследования L. Weiser (2020), во внимание необходимо принимать риски дренирования цемента, и 1 мл костного цемента с каждой стороны может обеспечить достаточную стабильность винтов [264]. Разброс данных по эффективности аугментации костным цементом можно объяснить в том числе и тем, что её эффект снижается по мере увеличения

плотности костной ткани, и наименее выражен, если используется в условиях нормальной губчатой костной ткани [117].

Данные клинических исследований также свидетельствуют об эффективности аугментации тел позвонков ПММА при транспедикулярной фиксации у пациентов с остеопорозом как при травматических повреждениях, так и при дегенеративной патологии переходной тораколумбальной и поясничной области. По результатам большинства опубликованных работ, не отмечено расшатывания винтов у пациентов с остеопорозом после транспедикулярной фиксации с аугментацией ПММА [89, 295, 296]. С другой стороны, есть данные, свидетельствующие о том, что технология не решает полностью проблему расшатывания винтов, и частота этого осложнения варьирует в пределах 1,16 – 29,4% наблюдений пациентов, которым выполнялась транспедикулярная фиксация с аугментацией ПММА [45, 265, 310]. Лишь в одном исследовании указана еще одна биомеханическая особенность винтов, установленных на цемент, которая объясняет механизм их расшатывания. При аугментации точка опоры смещается вентрально, в тело позвонка, что увеличивает рычаг, расшатывающий винты [321]. Предполагается, что именно по указанной причине в тесте с циклической нагрузкой на винты наблюдаемый эффект от аугментации винтов существенно ниже, чем в тестах на вырывание [117, 161].

Имея ряд противоречий в отношении эффективности, аугментация ПММА имеет дополнительные недостатки. Они обусловлены тем, что в этом случае проводится инъекция жидкого цемента. Распространение жидкости является неконтролируемым процессом, и всегда существует риск проникновения цемента в сосудистое русло с дренированием в позвоночный канал и паравертебральные сосуды с возможным последующим развитием легочной эмболии [77, 169, 181, 197, 300]. Причиной дренирования в сосудистое русло является соединение венозной системы тел позвонков с внутренним и наружным венозным сплетениями позвоночного столба. Эти венозные коллекторы лишены клапанов и дренируются в восходящую поясничную вену, непарную или полунепарную вену. В итоге эмболы из цемента могут попасть в сердце и легкие через систему нижней и

верхней полых вен [329]. Существует несколько классификаций дренирования цемента в позвоночный канал. Согласно J.S. Yeom (2003), дренирование цемента классифицировано по морфологическому признаку. Выделены 3 типа: В тип – дренирование через венобазиллярную систему, С тип – дренирование через дефекты наружного кортикального слоя тел позвонков и S тип – дренирование через сегментарные вены, которое может приводить к цементной эмболии [181]. Считается, что В тип наиболее часто приводит к неврологическим нарушениям. Частота дренирования В типа составляет 22,9 – 41,3%, из них асимптоматичными были 80,0 – 96,72% [77, 273, 300]. В подавляющем большинстве наблюдений (98,8%) легочная эмболия асимптоматична, но описаны, в том числе, случаи с летальным исходом, а также наблюдения с перфорацией сердца, требующей экстренного оперативного вмешательства [273]. Дополнительным недостатком применения полиметилметакрилата является экзотермическая реакция при его полимеризации, во время которой температура может повышаться до 40 – 110°. Считается, что это является одной из причин развития неврологического дефицита при дренировании ПММА в позвоночный канал [76, 212].

Опасность применения ПММА также связана с риском развития так называемого синдрома имплантации цемента [70, 173, 293]. Осложнение проявляется развитием сердечной недостаточности, гипоксии, зарегистрированы случаи инфаркта миокарда и внезапной смерти после применения аугментации костной ткани полиметилметакрилатом [173, 241]. Предполагается, что кардиосупрессивным действием обладает мономер метилметакрилата [70]. Другими механизмами могут быть образование множественных жировых эмболов за счет увеличения давления в межтрабекулярном пространстве, анафилактическая реакция и активация комплемента при аугментации ПММА. Также не исключается сочетание всех указанных причин [70]. Менее изученными негативными эффектами применения полиметилметакрилата являются цитотоксический эффект на клетки хрящевой ткани, что может привести к увеличению скорости развития дегенеративных процессов в диске [120]. Скорость развития дегенеративных изменений может дополнительно увеличиться за счет нарушения питания диска

при блокировании сосудистого русла ПММА [163].

При таких рисках осложнений возникает вопрос, насколько биомеханический эффект применения ПММА оправдывает эти риски. Следует отметить, что данные опубликованные по эффективности аугментации с применением ПММА не лишены противоречий. Изучение биомеханического результата аугментации костной ткани выполнялось в ходе биомеханических исследований. В основе наблюдающихся несоответствий может быть то, что в большинстве случаев применялись тесты на вырывание винтов, в то время как известно, что такой механизм редко вызывает дестабилизацию транспедикулярного фиксатора [117, 161]. Наилучшим образом воспроизводит механизм развития этого осложнения усталостный тест с маятникообразной нагрузкой на винты, а биомеханические работы с применением именно этого теста составляют меньшинство [117]. Результаты этих тестов значительно отличаются: если в тестах на вырывание винтов выявлялось увеличение резистентности винтов до 348,0%, то в усталостных тестах эффект был значительно меньше [117, 161]. На результаты аугментации позвонков ПММА значительное влияние оказывала ее техника. В настоящее время применяются педикулярная, вертебропластическая техники аугментации и инъекция цемента через канюлированные фенестрированные винты. При педикулярной аугментации в заранее подготовленные для введения винтов каналы выполняется инъекция цемента, после чего вводится винт, который выдавливает его в тело позвонка как поршень. При вертебропластической или кифопластической технике аугментации в тело позвонка устанавливаются иглы, через которые вводят жидкий ПММА, после чего через каналы от игл устанавливают винты. При аугментации через фенестрированные винты цемент вводится через отверстия в винте, используя канюли, обеспечивающие соединение с системой для инъекции костного цемента [87]. Согласно опубликованным данным, кифопластическая и вертебропластическая техника аугментации превосходят педикулярную, а наибольший эффект достигается при инъекции цемента через канюлированные винты [87, 161, 248, 255].

Биомеханические недостатки методик, основанных на аугментации костной ткани цементом, обсуждаются не часто, тем не менее, опубликованы данные, что смещению точки опоры винта и центра вращения вентрально в тело позвонка приводит к его расшатыванию в ножке позвонка, так называемому проксимальному расшатыванию [117, 161]. Это иллюстрирует необходимость восстановления опороспособности костной ткани на всей траектории установки винта, но аугментация ножки позвонка с применением инъекции ПММА не рекомендуется для решения данной задачи, поскольку в подобном случае предполагается возрастание риска дренирования цемента в позвоночный канал. Дополнительным свидетельством о том, что аугментация костной ткани не решает в полной мере проблему расшатывания транспедикулярных винтов, являются исследования, в которых сообщается о частоте осложнения, составляющей 1,2 – 29,4% [45, 310].

Альтернативное решение с применением расширяющихся винтов не обладает достаточной эффективностью поскольку по биомеханическим свойствам разработанные имплантаты уступают эффекту установки винтов на костный цемент [106]. Применение расширяющихся винтов не решает проблему их дестабилизации, кроме того, при поломке расширяющегося винта крайне сложно удалять его фрагменты [153]. При разработке этих имплантатов предполагалось, что расширяющийся сегмент может быть легко коллабирован, но не учитывалось, что в его области может произойти врастание соединительной и костной ткани, которое сделает невозможным удаление винта [153].

Недостатки вышеуказанных способов аугментации костной ткани привели к попыткам разработки альтернативных техник без применения жидких и цитотоксичных веществ. Для аугментации позвонков в качестве альтернативы ПММА рассматривался такой материал, как костная крошка. Впервые результаты применения аллокости для аугментации позвонков были опубликованы в 1994 году, однако результаты применения такой техники с применением кости как в виде крошки, так и в виде тонких стержней, значительно уступали результатам применения ПММА по прочности [238]. В 2019 году опубликованы результаты

биомеханического исследования техники аугментации костной ткани – аналога ранее использованной, в ходе которой для аугментации позвонков используется аллокость [64]. Согласно результатам исследования, аугментация позвонков костной крошкой увеличивала резистентность винтов на вырывание на 47,0%, количество циклов при краниокаудальной нагрузке увеличивалось на 31,0%, резистентность к максимальной дестабилизирующей силе при краниокаудальной нагрузке – на 21,0%. Также было выявлено, что максимальный эффект достигается при аугментации на протяжении всей траектории винта, причем использование крошки с размером частиц величиной 1 мм давало лучший эффект, чем если их размер составлял 2 мм. Разработанный способ показал себя многообещающим, но менее эффективным, чем аугментация с применением ПММА.

Анализ литературы свидетельствует о том, что необходима разработка методики аугментации костной ткани, которая была бы лишена недостатков, обусловленных необходимостью выполнять инъекции жидкого цемента, его химическими свойствами, и которая позволила бы выполнить аугментацию на протяжении всей траектории введения винта.

1.4 Технические решения, применяющиеся при нестабильности имплантатов

Несмотря на современное развитие технологий оперативного лечения патологии позвоночника, частота нестабильности транспедикулярного фиксатора за счет поломки или расшатывания его компонентов остается существенной. Этому способствует, в том числе и увеличивающаяся частота оперативных вмешательств с применением транспедикулярной фиксации и межтелового спондилодеза. Наибольший риск развития нестабильности имплантатов отмечается у пациентов старшего возраста с нарушением плотности костной ткани. Частота осложнения может составлять 18,0 – 27,0%, превышая 50,0% у пациентов с многоуровневой фиксацией [164, 207, 282]. Также есть данные, что около 13,0% пациентов, которым выполнено оперативное вмешательство на позвоночнике с применением транспедикулярной фиксации в последующем выполняется ревизионное вмешательство [272]. В настоящее время предложено несколько способов

повторных операций при нестабильности фиксатора: применение винтов большего диаметра и большей длины, аугментация позвонков костным цементом, применение расширяющихся винтов и специальных якорей, бикортикальное введение винтов, применение винтов со специальными покрытиями, например, гидроксиапатитом [63, 106].

Доказано, что эффект от применения винтов большей длины незначительный, особенно у пациентов с нарушением плотности костной ткани [240, 271], поэтому наиболее часто применяющимся и простым решением является применение винтов большего диаметра. Если принято решение применить винт большего диаметра, то он должен быть, как минимум, на 2 мм больше, чем установленный при первичном вмешательстве, а при значительном расшатывании должен на 2 мм превышать размеры рентгенпрозрачной области, обусловленной расшатыванием [150, 275, 328]. Применение такой тактики ревизионного вмешательства может быть ограничено размером ножки и доступностью винтов необходимого диаметра. Применение такой стратегии может быть связано с риском перелома ножки позвонка, особенно у пациентов с нарушением плотности костной ткани. Несмотря на то, что обсуждаемая стратегия ревизионных вмешательств является наиболее часто используемой, данные о ее эффективности остаются весьма противоречивыми. Источником несоответствий также являются выводы, основанные на результатах тестов на вырывание винтов в то время, как усталостный тест в большей степени воспроизводит биомеханику при физиологической нагрузке, в большей степени отражая действительность [64, 161]. Увеличение диаметра винта на 1 мм в тестах на вырывание повышает резистентность на вырывание на 24,0% в то время, как при выполнении усталостного теста биомеханический эффект такой стратегии существенно меньше, и увеличивает толерантность к нагрузкам только на 5,0% [161].

Сомнительным является преимущество бикортикальной установки винтов при транспедикулярной фиксации, особенно при выполнении ревизии фиксатора. Известно, что на 60,0% резистентность винта к вырыванию обеспечивается механическими свойствами ножки позвонка, в то время, как на 15,0 – 20,0% –

губчатым веществом тела позвонка и 20,0 – 25,0% – передним кортикальным слоем тела позвонка, что было доказано в ходе биомеханических тестов [32]. Несмотря на то, что некоторые хирурги регулярно используют эту технику, многие считают ее неоправданно опасной в связи с риском повреждения магистральных сосудов, включая аорту и нижнюю полую вену, которые могут быть даже отсроченными за счет формирования пролежня [103, 104, 249, 277]. Исследования доказали, что в любом положении пациента магистральные сосуды расположены непосредственно у позвоночника, и безопасным является пенетрация переднего кортикального слоя тела позвонка не более, чем на 4 мм [233, 249]. Оценивая риски и потенциальный эффект обсуждаемого метода остается вопрос: стоит ли вышеуказанных рисков увеличение прочности фиксации на 20,0 – 25,0%. Тем более, что бикортикальная фиксация уступает по биомеханическому эффекту установке винтов на костный цемент и эффекту от применения расширяющихся винтов [106].

Возможно, по этой причине большую популярность для выполнения ревизионных оперативных вмешательств приобрела установка винтов на костный цемент, но этот способ имеет свои недостатки. Если применяется цемент высокой вязкости, то уменьшается прочность адгезии к костной ткани. С другой стороны, при уменьшении вязкости используемого цемента возрастает вероятность его дренирования в позвоночный канал [304]. Кровотечение из губчатой кости дополнительно может уменьшить адгезию цемента, затрудняя выполнение реконструкции дефекта костной ткани при открытом вмешательстве [196]. Оптимальной техникой введения костного цемента может быть инъекция его через иглы, введенные парапедикулярно без удаления винтов, но этот способ также имеет слабые стороны, поскольку сохраняются риски дренирования цемента в сосудистое русло и развития синдрома имплантации цемента [134, 224]. Кроме того, маловероятно, что аугментация костным цементом устранил риск усталостного перелома и проксимального расшатывания фиксатора [206, 298].

Отдельно следует остановиться на особенностях применения расширяющихся винтов и аугментации на основе ПММА при ревизионных вмешательствах. В биомеханических исследованиях доказано, что в этом случае

применение расширяющихся винтов и установка их на цемент имеют приблизительно одинаковый эффект [235]. На этом основано предположение, что расширяющиеся винты могут быть безопасной альтернативой установке винтов на костный цемент. С другой стороны, не следует чрезмерно полагаться на эти технологии, поскольку описана дестабилизация как расширяющихся винтов, так и установленных на цемент. При аугментации позвонков потенциальными механизмами могут быть поломка винтов и их проксимальное расшатывание [206, 298]. Также сообщается, что поломка расширяющихся винтов наблюдалась у 2,8% пациентов [153, 193]. В этих случаях важна в том числе и пригодность этих методик к ревизии, которая предполагает удаление винтов и их фрагментов. Считалось, что удаление расширяющихся винтов не должно вызывать технических трудностей с помощью специального инструмента, который коллабирует расширенный сегмент [106, 115, 136, 193]. Следует отметить, что тестирование этой гипотезы проводилось *ex-vivo*, следовательно, не учитывалось прорастание тканями расширяющегося сегмента винта, который не монолитен.

Обращает внимание, что несмотря на существенную частоту дестабилизации имплантатов опубликовано небольшое количество работ, направленных на изучение и систематизацию подходов к этой проблеме. Чаще всего предлагается установка винтов на костный цемент, применение винтов большего диаметра и расширяющихся винтов. Если только заменить винты, без обеспечения оптимального распределения нагрузки на имплантаты, возможен их повторный перелом или расшатывание. Независимо от того, первичное или ревизионное вмешательство, для обеспечения хорошего результата необходимо также обеспечение надежного костного блока, который сведет к минимуму нагрузку на имплантаты с течением времени. Рубцы после выполненного первичного вмешательства могут затруднить работу с невральными структурами, поэтому оптимальной стратегией представляется применение оперативных вмешательств из вентрального доступа с применением переднего спондилодеза кейджем большой площадью опоры, замена фиксатора с восстановлением опороспособности костной ткани и формированием резервного заднего спондилодеза. Циркулярный

спондилодез с формированием заднего костного блока может быть особенно важным у пациентов с нарушением плотности костной ткани, поскольку задние структуры меньше, чем тело позвонка, вовлечены в патологический процесс. Поэтому формирование заднего костного блока не зависит от костной плотности тел позвонков [22].

Подводя итоги, очевидно, что с увеличением продолжительности жизни будет возрастать доля пациентов с дегенеративной и травматической патологией позвоночника на фоне остеопороза. При дегенеративном стенозе позвоночника, сочетающейся с нестабильностью сегментов и при нестабильной травме оперативные вмешательства с применением транспедикулярной фиксации и межтелового спондилодеза являются единственным эффективным решением. Нарушение плотности костной ткани, распространенное у пациентов пожилого возраста, существенно увеличивает риски формирования псевдоартроза после спондилодеза и нестабильность имплантатов, что требует применения ресурсоемких и травматичных ревизионных вмешательств. Принимая во внимание ежегодное количество оперативных вмешательств с применением декомпрессии с транспедикулярной фиксацией и спондилодезом и частоту развития нестабильности имплантатов, очевидна клиническая и социально-экономическая значимость проблемы.

Накопленные данные свидетельствуют о том, что помимо плотности костной ткани, хирургическая тактика в значительной степени может повлиять на стабильность фиксации. Также свойства применяемых имплантатов могут иметь существенное значение для обеспечения стабильности сегментов. Следовательно, необходима разработка оценки риска имплантатзависимых осложнений с учетом большинства факторов, влияющих на частоту осложнения, включая свойства костной ткани, параметры имплантатов и хирургическую тактику.

Если приоритетом является стабильность фиксации, то непрямая декомпрессия с использованием вентрального доступа может быть альтернативой микрохирургической декомпрессии. Следует отметить, что оперативное вмешательство часто теряет клинический смысл, если не обеспечена адекватная

декомпрессия спинного мозга и корешков, но она в ряде случаев может конкурировать с необходимостью обеспечить стабильности сегментов. Отсутствие четких критериев, ограничивающих возможность непрямой декомпрессии, приводят к значительной частоте ревизионных вмешательств с применением микрохирургической декомпрессии.

Возможность увеличить стабильность фиксации за счет оптимальной хирургической тактики и выбора имплантатов не всегда учитывается при планировании оперативных вмешательств, и большинство хирургов предпочитают использовать костный цемент для увеличения стабильности фиксации. Это приводит к увеличению затрат на оперативное вмешательство, кроме того, односторонний подход, заключающийся только в попытке достигнуть максимальной прочности фиксации винтов в теле позвонка без использования других технических решений, не всегда обеспечивает надежный результат. Таким образом, необходима разработка системы прогнозирования рисков развития нестабильности имплантатов, основанной не только на оценке свойств костной ткани, но еще и с учетом особенностей планирующегося оперативного вмешательства. Оценка факторов, влияющих на результаты, будет способствовать разработке оптимальной тактики с дифференцированным применением различных техник декомпрессии, спондилодеза и способов увеличения стабильности фиксации.

ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1 Общая характеристика материала и этапов исследования

Для решения поставленных задач, исследование было разделено на этапы с различным дизайном исследования. Клинический материал составил 798 наблюдений. Объектом диссертационного исследования являлись пациенты с различной патологией позвоночника:

1. С неуточненной болью в области поясничного отдела позвоночника (Код МКБ М54.5) – 100 пациентов.
2. Пациенты с дегенеративным стенозом поясничного отдела позвоночника и нестабильностью сегментов (Коды МКБ М48.0, М99.5, М99.3), истмическим и дегенеративным спондилолистезом (М43.1) – 435 пациентов.
3. Пациенты с травматическими повреждениями поясничного отдела позвоночника и области грудопоясничного перехода с данными за посттравматический стеноз позвоночного канала (уровни Th11–L5 включительно), тип повреждения А3, А4, В1, В2, С, переломов на фоне остеопороза типа OF4, OF5, группы С, D, E ASIA (Коды МКБ S22.0, S32.0, M80.1, M80.8) – 204 наблюдения.
4. Пациенты с переломами позвонков на уровне поясничного отдела позвоночника и грудопоясничного перехода на фоне остеопороза типа OF4, OF5 (коды МКБ M80.1, M80.8) – 48 наблюдений, и пациенты со стенозом позвоночного канала на уровне поясничного отдела позвоночника (коды МКБ М48.0, М99.3, М99,5) – 11 наблюдений. У этих пациентов при предоперационном обследовании выявлен остеопороз позвоночника и выполнена аугментация позвонков в ходе выполнения оперативного вмешательства.

Включение пациентов было выполнено в различные этапы исследования, предназначенные для решения одной определенной задачи, на основании чего были сформированы группы. По этой причине суммарный демографический

анализ всех наблюдений нецелесообразен, он будет выполнен при описании методик каждого из исследований, включенных в работу.

Дизайн исследования и схема формирования групп представлены на рисунках 2.1. и 2.2.



Рисунок 2.1 – Дизайн исследования. Схема формирования групп

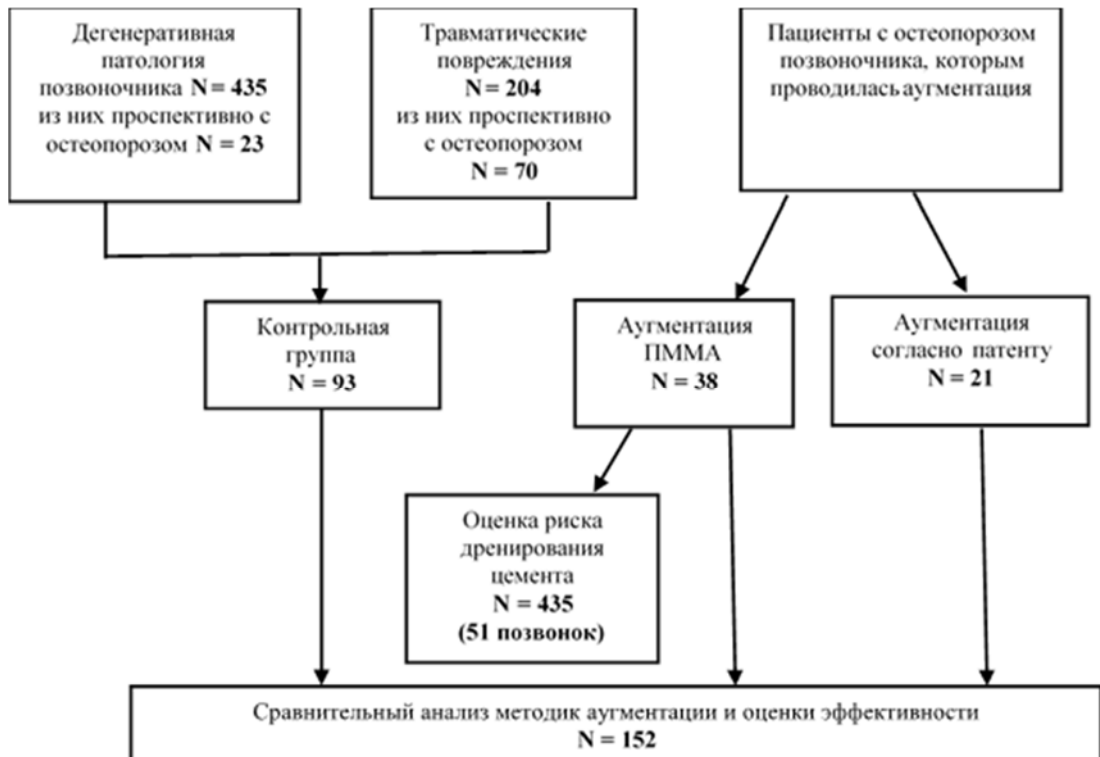


Рисунок 2.2 – Дизайн исследования. Схема формирования групп (продолжение)

2.2 Оценка корреляции частоты низкоэнергетических переломов, частоты расшатывания транспедикулярного фиксатора и радиоденсивности

Для решения первой задачи выполнено поперечное исследование, в ходе которого определена связь между радиоденсивностью губчатой костной ткани тел позвонков и частотой патологических переломов. Проанализированы результаты КТ 100 пациентов возрастом старше 40 лет ($m=70,5916 \pm 0,7104$ $\sigma=7,1040$) из них 17 мужчин, 83 женщины, которые проходили обследование в ФГБУ ННИИТО Минздрава России (в настоящее время - ФГБОУ ВО «ПИМУ» Минздрава России) в 2012 – 2014 годах по поводу болевого синдрома, обусловленного патологией поясничного отдела позвоночника (код МКБ М54.5). Из исследования исключены пациенты с высокоэнергетической травмой позвоночника, пациенты с новообразованиями.

КТ-сканирование проводили по стандартному протоколу, как и при выполнении всех других исследований, на уровне Th10–L5 на одном и том же компьютерном томографе – Aquilion 32, Toshiba corporation. Параметры стандартного протокола были следующими: толщина срезов 0,5 мм, область исследования 50 см, вольтаж 120 кВ, сила тока 300 мА, авто mAs 180–400, винтовой шаг 21,0. Для определения костной плотности использовалось программное обеспечение Vitrea5.2.497.5523. Определение костной плотности позвонков проводилось на уровне L2 или L3, не вовлеченном в патологические процессы. Измерение костной плотности у каждого пациента проводили в трех плоскостях: сагиттальной, фронтальной и аксиальной проекциях. Томограммы во фронтальной и сагиттальной плоскостях проходили через геометрический центр тела позвонка, срезы в аксиальной проекции – через центр ножек. В каждой плоскости костную плотность определяли на площади максимальной площади без захода в кортикальные слои позвонка. После измерения костной плотности в трех плоскостях вычислялось среднее значение для каждого наблюдения, которое использовалось в дальнейших расчетах. По результатам КТ-исследования регистрировались наблюдения со спонтанными низкоэнергетическими переломами тел позвонков, а также случаи многоуровневых дегенеративных

изменений со снижением высоты диска более, чем на 50,0% и признаками субхондрального склероза, поскольку в этом случае риск патологических переломов снижается (Рисунок 2.3). Прогностическая значимость костной плотности позвонков и выявленных дегенеративных изменений в отношении риска низкоэнергетических переломов оценивалась с помощью логистического регрессионного анализа.

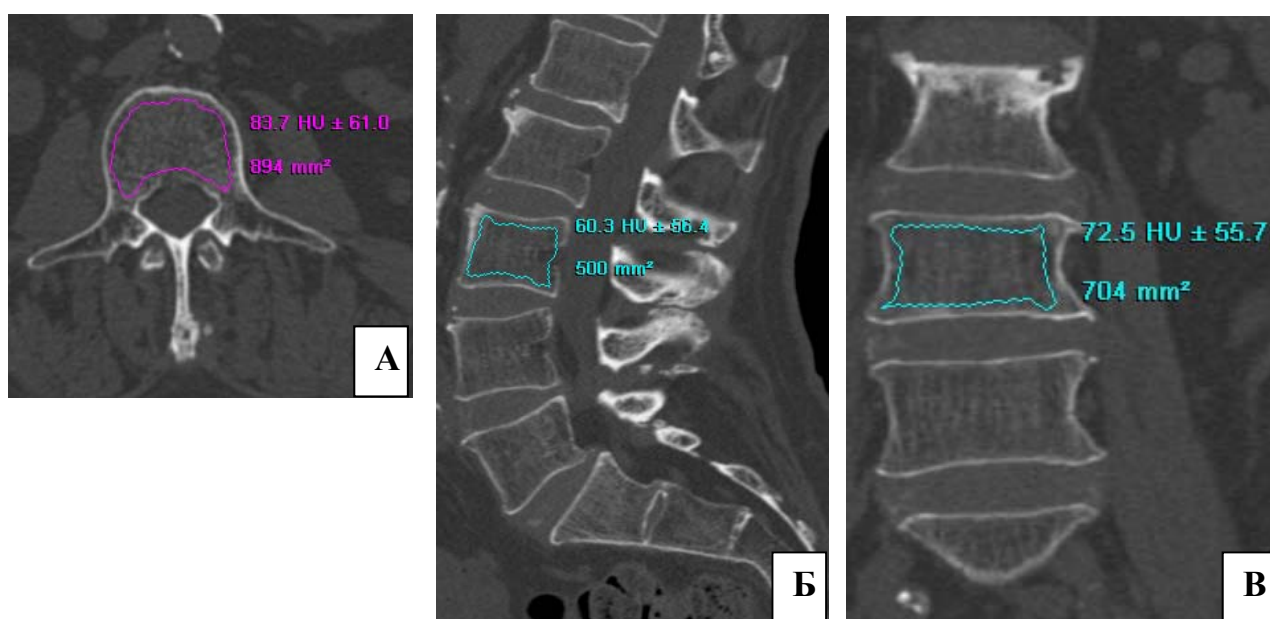


Рисунок 2.3 – Методика измерения радиоденсивности губчатой костной ткани тел позвонков – аксиальная (А), сагиттальная (Б) и фронтальная (В)

Данной группе пациентов противопоставлены результаты регрессионного анализа, оценивающего связь частоты дестабилизации транспедикулярного фиксатора и радиоденсивности, выполненного на гетерогенной группе, насчитывающей 535 пациентов. Из них 204 были с травмами поясничного отдела позвоночника и грудопоясничного перехода, а 331 с дегенеративной патологией.

2.3 Анализ факторов, влияющих на результаты оперативного лечения у пациентов с дегенеративным стенозом позвоночного канала на фоне нестабильности сегмента

2.3.1 Общая характеристика этапа исследования

Для оценки факторов, влияющих на результаты оперативного лечения пациентов с дегенеративным стенозом позвоночного канала, была сформирована проспективная группа из 23 пациентов, у которых были выявлены признаки остеопороза позвоночника по данным КТ (радиоденсивность менее 110 НУ). Данные больные участвовали в этапе исследования, направленном на изучение результатов операций с применением аугментации позвонков. Проспективная группа была дополнена 308 ретроспективными наблюдениями. В итоге, анализ результатов в группе пациентов, включенных для разработки дифференцированной тактики при дегенеративном стенозе позвоночника, выполнялся амбиспективно. В ходе исследования выявлены факторы, влияющие на частоту дестабилизации транспедикулярного фиксатора с использованием общей модели логистического регрессионного анализа. Из этой группы после стандартизации за счет исключения пациентов, которым применялись винты с разными характеристиками и вмешательства из вентрального доступа, сформирована когорта из 175 пациентов для изучения влияния дизайна винта на частоту дестабилизации фиксатора, для чего использована общая модель логистического регрессионного анализа.

Критерии включения и показания к оперативному вмешательству:

- наличие неврологического дефицита – сенсорного или моторного;
- клиника нейрогенной перемежающейся хромоты;
- корешковый болевой синдром со значением ВАШ не менее 40 баллов (шкала 0 – 100) и индекса ограничения жизнедеятельности Освестри не менее 40,0%;
- МРТ и КТ данные за дегенеративный стеноз поясничного отдела позвоночника, соответствующие клиническим данным;

- отсутствие эффекта от консервативного лечения, проведенного в течение 3 месяцев, если клиника дегенеративного стеноза позвоночного канала проявлялась болевым синдромом без неврологического дефицита;
- клинические и рентгенологические данные за нестабильность позвоночно-двигательного сегмента. Критерием нестабильности являлось изменение трансляции в сагиттальной плоскости более, чем на 3 мм при выполнении функциональных рентгенограмм [191].

При наличии неврологической симптоматики, соответствующей стенозу позвоночного канала без клиники нестабильности ПДС, подтвержденному результатами функциональных рентгенограмм, проводилась недестабилизирующая декомпрессия без фиксации и спондилодеза, эти пациенты не включались в исследование. Не включены в исследование также пациенты с аксиальным болевым синдромом без радикулярной симптоматики и клиники перемежающейся нейрогенной хромоты.

Критериями исключения из исследования были:

- спондилолистез 3, 4 степени;
- дегенеративная деформация, с нарушением сагиттального баланса ($SVA > 5$ см, $PI-LL > 10$), требующая позвоночно-тазовой фиксации или протяженной фиксации более 5 сегментов;
- признаки нарушения техники транспедикулярной фиксации и повторной установки винтов со сменой траектории;
- применение различных видов спондилодеза во время одной операции;
- выполнение межтелового спондилодеза не во всех сегментах, включенных в фиксацию;
- односторонняя транспедикулярная фиксация;
- новообразования позвоночника;
- клиника дегенеративного стеноза позвоночного канала без признаков нестабильности сегмента;

- аксиальный болевой синдром без клиники нейрогенной перемежающейся хромоты или компрессионного радикулярного синдрома.

2.3.2 Предоперационное обследование пациентов с дегенеративным стенозом позвоночного канала на фоне нестабильности сегмента

Отбор для оперативного лечения проводился на основании клинических данных. На амбулаторном приеме проводилось неврологическое обследование, а также применялись визуально-аналоговая шкала боли (ВАШ) и опросник ограничения жизнедеятельности Освестри. Интенсивность боли по ВАШ оценивалась отдельно в нижних конечностях и в области поясницы. Кандидатами на включение в исследование были пациенты с клиникой нейрогенной перемежающейся хромоты, компрессионным радикулярным синдромом. Обязательным условием было сочетание радикулярной симптоматики или клиники перемежающейся нейрогенной хромоты с аксиальным болевым синдромом. В дальнейшем проводилась верификация диагноза с применением инструментальных методов исследования.

Инструментальные методы исследования

Целью исследования являлись верификация диагноза и дифференциальный диагноз заболеваний, выбор метода лечения и планирование оперативного вмешательства.

Рентгенография позвоночника на протяжении

Целью исследования было выявление пациентов, нуждающихся в коррекции сагиттального баланса. Исследование проводилось стоя, в удобном (эргономичном) для пациента положении. Наиболее важными критериями были: смещение кпереди отвесной линии с уровня С7 более 5 см, и несоответствие угла наклона таза и поясничного лордоза более, чем на 10°. Указанные параметры свидетельствуют об имеющемся нарушении баланса позвоночника, требующем

выполнения протяженной фиксации, что являлось критерием исключения из исследования. Исследование выполнялось в обязательном порядке пациентам с многоуровневой дегенеративной патологией, так как именно у этой группы больных наиболее вероятно нарушение сагиттального баланса. Всего выполнено исследование 216 пациентам. Пациенты, нуждающиеся в коррекции сагиттального баланса исключены из исследования.

Функциональная спондилография

Функциональная спондилография являлась обязательным методом исследования в этой группе пациентов (выполнена в 100,0% наблюдений). Целью функционального исследования было определить, имеется ли нестабильность позвоночно-двигательного сегмента, что требует его фиксации и межтелового спондилодеза. Снимки производились в положении стоя с наклоном вперед и временной экспозицией не менее 1 минуты – до появления характерных болей в позвоночнике, после чего выполнялась спондилограмма в боковой проекции. Затем проводились снимки в положении стоя с наклоном назад. Критерием нестабильности ПДС было изменение трансляции в сагиттальной плоскости более, чем на 3 мм [191].

Магнитно-резонансная томография

Магнитно-резонансная томография (МРТ) томография выполнена 428 пациентам (93,0% наблюдений). Исследования выполнялись на магнитно-резонансных томографах фирмы Siemens, General Electric, Phillips, напряженность магнитного поля составляла 1,5 – 3 Тл. Метод МРТ наиболее информативен при исследовании пациентов с дегенеративными заболеваниями позвоночника. МРТ позволяет дифференцировать заболевания, проявляющиеся рефлекторным вертебральным болевым синдромом, среди которых встречается онкопатология и воспалительные заболевания позвоночника. При оценке МР-томограмм оценивалось состояние резервных пространств позвоночного канала, наличие

признаков спондилоартроза и признаков нестабильности в виде спондилолистеза. Результаты МРТ использовались для качественной оценки дегенеративной патологии. На основании результатов МРТ и КТ дегенеративный стеноз позвоночного канала по локализации классифицировался как латеральный, центральный и фораминальный. Также оценивалась патология диска – наличие и морфологические особенности грыжи диска. По морфологическим особенностям дегенеративного поражения диска принято различать симметричное выпячивание, протрузию, экструзию и секвестрированную грыжу диска [195].

Рентгеновская компьютерная томография

Рентгеновская компьютерная томография (КТ) выполнена в 100,0% случаев с дегенеративной патологией позвоночника. Стандартный протокол КТ-исследования приведен в разделе, посвященном проблеме оценки свойств костной ткани. Результаты КТ в сочетании с результатами МР-томографии позволяли уточнить, имеется ли компрессия за счет мягкотканых структур или имеется костная компрессия корешков за счет остеофитов, гипертрофированных дугоотростчатых суставов и оссифицированных связок. Результаты КТ использовались для количественной оценки имеющейся патологии. С помощью КТ определялась радиоденсивность губчатой костной ткани тел позвонков, эти данные использовались для оценки риска дестабилизации имплантатов. Методика оценки радиоденсивности губчатой костной ткани приведена в разделе, посвященном оценке корреляции частоты низкоэнергетических переломов, частоты расшатывания транспедикулярного фиксатора и радиоденсивности. Радиоденсивность определялась на уровнях L2 или L3 позвонков. Известно, что 60,0 % прочности винта к вырыванию обеспечивается ножкой позвонков, как предполагалось, за счет опоры винта на кортикальный слой ножки позвонка [226]. При анализе послеоперационных КТ выявлено, что размеры ножки позвонка на поясничном уровне значительно больше, чем диаметр винта, и контакта с кортикальным слоем не происходит (Рисунок 2.4). Тем не менее, радиоденсивность губчатой ткани ножки позвонка выше, чем тела. У 52 пациентов выполнено

сравнение радиоденсивности губчатой ткани тела и ножки позвонка (Рисунок 2.5). Средние значения и дисперсия составили $113,70 \pm 8,26$; $\sigma = 59,658$ и $210,33 \pm 12,64$; $\sigma = 91,15$ для радиоденсивности губчатой ткани тела и ножек позвонка соответственно. Значения радиоденсивности отличались статистически значимо, $p < 0,0001$ (двухсторонний тест Аспин-Уэлча, учитывая неоднородность дисперсий на уровне статистической значимости $p = 0,0029$). Радиоденсивность ножки позвонка и тела коррелировали, ($r = 0,7960$ $p < 0,0001$, корреляция Пирсона).



Рисунок 2.4 – Положение винта в ножке позвонка

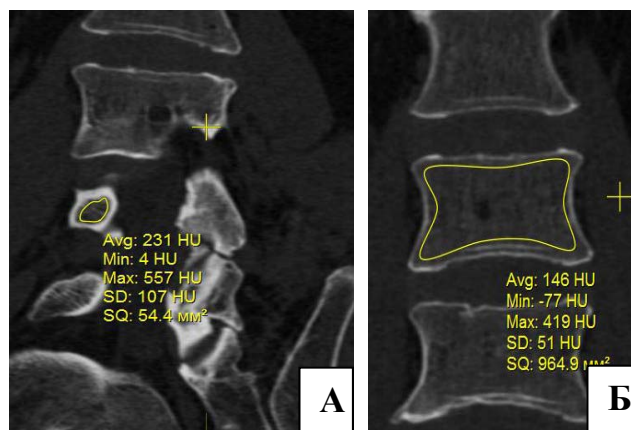


Рисунок 2.5 – Радиоденсивность губчатой костной ткани ножки (А) и тела позвонка (Б)

При помощи данных КТ оценивалось состояние дугоотростчатых суставов, выраженность дегенеративных изменений классифицировалась по D. Weishaupt (1999) [208]. Регистрировались наблюдения с четвертой степенью дегенеративных изменений; в этом случае костная ткань формируется в периартикулярных тканях. Данный признак, свидетельствующей об ограниченной мобильности сегмента, считается неблагоприятным для выполнения не прямой декомпрессии. Также оценивалось наличие вакуум феномена в дугоотростчатых суставах и диске, поскольку этот признак свидетельствует о мобильности сегмента и благоприятен для выполнения не прямой декомпрессии. По результатам КТ оценивались такие параметры, как диаметр форамины, площадь сечения позвоночного канала на уровне максимального сужения и глубина бокового канала (Рисунок 2.6). Полученные данные использовались для оценки корреляции данных КТ и клиники, а также для оценки эффекта не прямой декомпрессии.

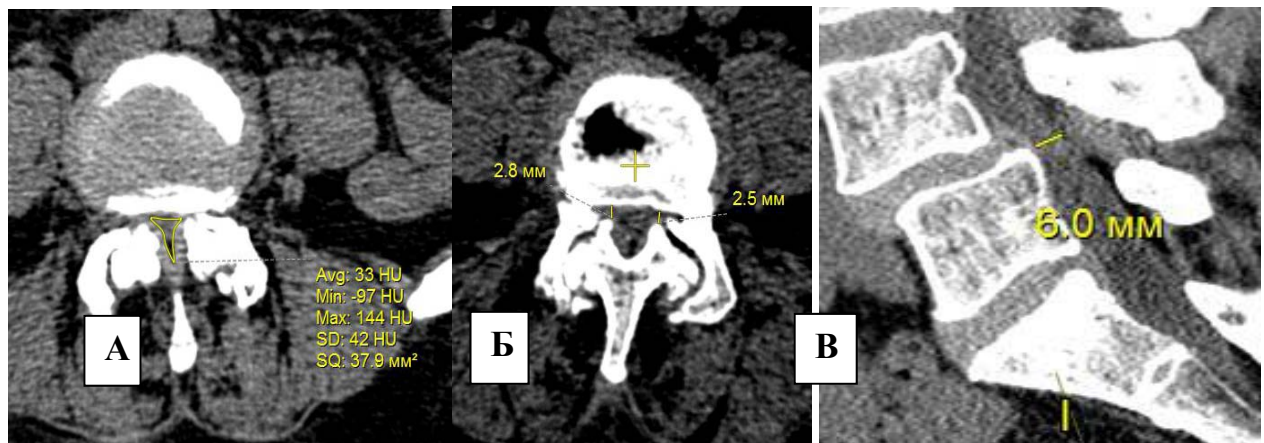


Рисунок 2.6 – Методика измерения параметров позвоночного канала: измерение площади поперечного сечения (А); место максимального сужения позвоночного канала (Б); измерение глубины боковых каналов (В)

Выбор КТ для количественного анализа обусловлен тем, что данные КТ имеют большую чувствительность в отношении выявления сужения резервных пространств, обусловленных дегенеративными заболеваниями [209].

Кроме того, результаты КТ имели хорошую воспроизводимость за счет хорошего контрастирования желтой связки, содержимого позвоночного канала, диска и дугоотростчатых суставов (Рисунок 2.7).

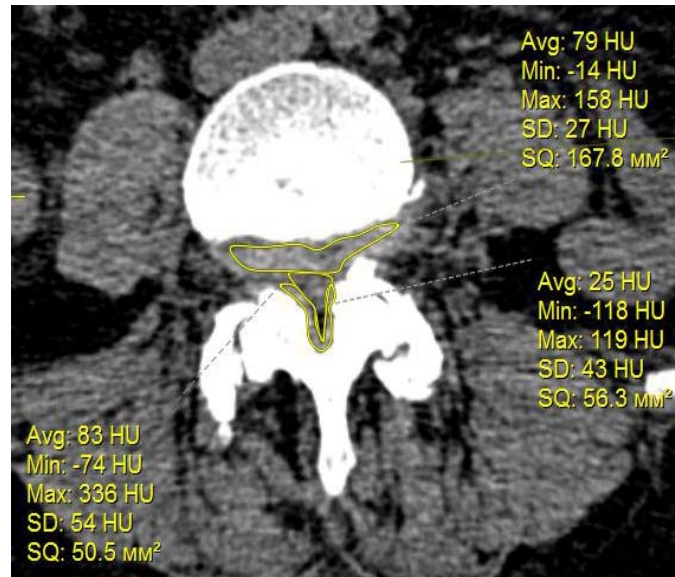


Рисунок 2.7 – Дифференцирование желтой связки, ткани диска, содержимого позвоночного канала по данным радиоденсивности

Контрастная компьютерная томография или КТ-миелография

Контрастная компьютерная томография или КТ-миелография (КТМГ) выполнялась при противопоказаниях к выполнению МРТ (кардиостимулятор, инородные тела, имплантаты из ферромагнитных материалов), а также для диагностики осложнений после оперативных вмешательств. КТМГ выполнена 27 пациентам, что составляет 6,1% наблюдений.

Техника исследования: в стерильных условиях выполнялась люмбальная пункция, всегда выше или ниже уровня планируемого оперативного вмешательства, чтобы не спровоцировать интраоперационную ликворею. Кроме того, известно, что при значительном сужении резервных пространств, возможен полный ликворный блок на уровне компрессии и проводить люмбальную пункцию на этом уровне нецелесообразно. Эндолюмбально вводилось 10 мл раствора «Омнипак». КТ проводилась через 2 – 4 часа после введения контраста, так как необходимо равномерное контрастирование субдурального пространства.

В итоге суммарные результаты инструментальных исследований у пациентов с дегенеративной патологией были следующими:

- стеноз позвоночного канала на фоне нестабильного спондилолистеза

выявлен у 150 – 34,0%;

- стеноз позвоночного канала с нестабильностью – у 239 пациентов – 54,2%;
- экструзия диска выявлена у 52 пациента – 11,8%.

2.3.3 Техники оперативных вмешательств при дегенеративном стенозе поясничного отдела позвоночника на фоне нестабильности сегмента

Техника оперативных вмешательств при дегенеративных заболеваниях позвоночника подробно описана в обзоре R. J. Mobbs (2015) [190]. В ходе выполнения исследования применялись следующие оперативные вмешательства:

1. Транспедикулярная фиксация и задний спондилодез – в этом случае на уровне компрессии выполнялось удаление желтой связки и частично резецировались прилежащие к желтой связке дуги, проводилась медиальная резекция дугоотростчатых суставов с удалением остеофитов (не более 50,0%) и выполнялась транспедикулярная фиксация с выполнением заднелатерального спондилодеза. Задний спондилодез во всех наблюдениях выполнялся за счет артродезирования дугоотростчатых суставов, когда резецировались суставные поверхности и капсулы суставов и в образовавшийся дефект укладывались трансплантаты из аутокости и аллокости. Дополнительно проводилась декортикация задних структур, включающих дугу и дугоотростчатые суставы и укладывалась дополнительно крошка из аллокости или аутокости. Из 331 пациента, включенных в данный фрагмент исследования, по этой методике операция выполнена у 41 пациента (12,4%).

2. Транспедикулярная фиксация в сочетании с трансфораминальным спондилодезом. В этом случае резецировались с одной или с двух сторон дугоотростчатые суставы, трансфораминально осуществлялся доступ к диску, максимально удалялась ткань диска, после чего в межпозвонковый промежуток вводилась аутокость объемом не менее 10 см³. Далее в межпозвонковый промежуток устанавливался кейдж с аутокостью и выполнялась транспедикулярная фиксация сегментов. Всем пациентам, включенным в

исследование выполнено открытое оперативное вмешательство. Такая хирургическая тактика применялась у 186 пациентов (56,2%).

3. Транспедикулярная фиксация в сочетании с межтеловым спондилодезом DLIF – оперативное вмешательство выполнялось в два этапа. Во время выполнения первого этапа осуществлялась разметка под контролем флюороскопии, отмечались края диска в боковой проекции. После разметки операционного поля выполнялась люмботомия с тупой диссекцией мышц брюшной стенки. Таким образом осуществлялся доступ в забрюшинное пространство. Доступ к диску был несколько модифицирован: во всех случаях осуществлялся доступ через вентральную порцию поясничной мышцы, осуществляя ретракцию назад максимально возможно большей порции. Это снижало риск повреждения сплетения на уровне L4–L5. При использовании модифицированного доступа нет необходимости использовать нейромониторинг. После экспозиции диска устанавливался ретрактор, вскрывалось фиброзное кольцо, удалялась максимально ткань диска. Затем иссекалось фиброзное кольцо на противоположной стороне. После подготовки поверхностей тел позвонков в межтеловой промежуток устанавливался кейдж для DLIF с аллокостью. Вторым этапом выполнялась перкутанная транспедикулярная фиксация. У 20 пациентов передний спондилодез был дополнен разработанным способом перкутанного артродеза (патент на изобретение «Способ минимально инвазивной стабилизации позвоночно-двигательного сегмента на уровне поясничного отдела позвоночника» RU 2645418 C1, зарегистрирован в Федеральной службе по интеллектуальной собственности Российской Федерации, опубликован: 21.02.2018 Бюл. № 6). Перкутанный артродез выполняют следующим образом. Размечают траекторию введения спиц-направителей в сагиттальной плоскости через суставную щель дугоотростчатых суставов от верхушки верхнего дугоотростчатого сустава до основания ножки дужки нижнего позвонка позвоночно-двигательного сегмента. В указанном направлении пункционно-перкутанно проводят спицы-направители. По установленным спицам-направителям вводят 8G канюлированную фрезу, формируют ложе для трансплантата на протяжении всей суставной щели

дугоотростчатых суставов. 8G троакар формируют трансплантат, после удаления фрезы по спице-направителю в область сформированного ложа вводят 8G троакар. Полной фрезой 8G подготавливается цилиндрический трансплантат, соответствующий подготовленному ложу. По спице-направителю в область сформированного ложа вводится 8G троакар, через который в подготовленное ложе вводится трансплантат. Всего транспедикулярная фиксация с применением спондилодеза DLIF применялась у 56 пациентов (16,9%).

4. Транспедикулярная фиксация в сочетании с передним межтеловым спондилодезом ALIF. Выполнялась в два этапа. Первым этапом осуществлялся передний спондилодез ALIF. В положении на спине производился горизонтальный разрез с в проекции диска L5–S1 или тела L5 позвонка, если требовалось выполнить спондилодез на двух уровнях. Вскрывался горизонтально наружный апоневроз, тупым способом расслаивались мышцы передней брюшной стенки по средней линии. Через надпузырное пространство начиналась мобилизация брюшины, далее выполнялась диссекция структур забрюшинного пространства слева по направлению к средней линии, мобилизовались магистральные сосуды. Доступ к диску L5–S1 осуществлялся между подвздошными сосудами, к диску L4–L5 – слева, с мобилизацией и ретракцией магистральных сосудов вниз и вправо. После того, как была достигнута экспозиция диска вскрывалось фиброзное кольцо и максимально удалялась ткань диска. После подготовки поверхностей тел позвонков в межтеловой промежуток устанавливался кейдж для ALIF с аллокостью. Вторым этапом выполнялась перкутанная транспедикулярная фиксация. По этой методике операция выполнена у 53 пациентов (16,0%).

В послеоперационном периоде всем пациентам выполнена контрольная КТ, на которой верифицировались объем выполненной декомпрессии и правильность положения имплантатов. После оперативного вмешательства режим расширялся на следующие сутки после операции, независимо от выполняемой техники. Выписка осуществлялась на 5–6 сутки после двухэтапных вмешательств с применением спондилодеза из вентрального доступа, на 7–9 сутки после открытых вмешательств.

2.4 Исследование результатов непрямой декомпрессии корешков спинного мозга с применением спондилодеза из вентрального доступа

С целью уточнения показаний непрямой декомпрессии выполнены исследования на двух группах пациентов. Задачей первого фрагмента исследования являлось определение критических размеров позвоночного канала, обладающих максимальной чувствительностью и специфичностью в отношении неврологической симптоматики, обусловленной стенозом позвоночного канала. Задачей второго фрагмента исследования было оценить потенциальный эффект непрямой декомпрессии и факторы и определить апостериорно надежность выявленных критических параметров по данным КТ для прогнозирования результата оперативного лечения.

Первый фрагмент являлся поперечным исследованием и включал 104 пациента с компрессионной радикулярной симптоматикой или клиникой нейрогенной перемежающейся хромоты. Среди пациентов 28 были мужчинами, 76 – женщинами. Средний возраст составил 60 лет, $B=8,5092$; (максимум – 78 лет, минимум – 22 года). Регресс корешковой симптоматики у пациента в положении лежа расценивался как благоприятный признак для достижения клинически значимого результата при выполнении непрямой декомпрессии. У пациентов выполнялось измерение глубины бокового канала и площади поперечного сечения на уровне максимально выраженного сужения резервных пространств, определялись критические значения этих параметров, при которых не регрессирует неврологическая симптоматика в положении лежа.

Оценка рентгенологических результатов непрямой декомпрессии также является поперечным исследованием, которое включает 80 пациентов (17 мужчин, 63 женщины), которым выполнялась непрямая декомпрессия с применением спондилодеза из вентрального доступа (DLIF или ALIF). Медиана для возраста пациентов составила 59 лет, границы верхнего и нижнего квартилей – 54 и 65 соответственно; минимум – 32, максимум – 72 года. Показания к оперативному лечению были идентичны тем, которые применялись при включении пациентов в группу амбиспективного исследования результатов оперативного лечения при

дегенеративном стенозе позвоночного канала. В послеоперационном периоде для оценки результатов не прямой декомпрессии выполнено повторное измерение глубины бокового канала и площади поперечного сечения позвоночного канала. Оценены результаты не прямой декомпрессии по результатам КТ и связь предоперационных и послеоперационных параметров (применялась общая регрессионная модель – линейная регрессия или план ковариационного анализа – ANCOVA, в зависимости от типа данных).

Для верификации значимости выявленных пороговых значений параметров позвоночного канала сопоставлены клинические и рентгенологические результаты не прямой декомпрессии. С использованием ядерного дискриминантного анализа построена модель прогнозирования результата по шкале MacNab на основе послеоперационных значений площади поперечного сечения позвоночного канала и глубины боковых каналов.

2.5 Анализ факторов, влияющих на результаты лечения пациентов с посттравматическим стенозом позвоночного канала на уровне поясничного отдела позвоночника и грудопоясничного перехода

В исследование включено 204 пациента с травматическими повреждениями поясничного отдела позвоночника и переходной грудопоясничной области с уровня Th10 до L5 включительно. Набор группы пациентов с травматическими повреждениями на фоне остеопороза велся проспективно (группа сравнения для оценки эффективности технологии аугментации костной ткани, составившая 70 наблюдений). Проспективная группа дополнена 134 ретроспективными наблюдениями. В итоге, для оценки факторов, влияющих на результаты оперативного лечения травматических повреждений позвоночника поясничной и грудопоясничной области проведено амбиспективное исследование. Группа состояла из 117 мужчин - 57,3%, 87 женщин – 42,7%; средний возраст 40 лет, $\sigma = 15,01$; диапазон 18–71 год).

Критерии включения:

- посттравматический стеноз позвоночного канала, обусловленный нестабильными повреждениями С, В1, В2 А4 типов и условно стабильными повреждениями А3 типа;
- нестабильные переломы на фоне остеопороза типа OF4, OF5;
- пациенты групп С, D, E ASIA.

Критерии исключения:

- неврологический дефицит, соответствующий группам А и В ASIA;
- низкоэнергетические переломы, обусловленными новообразованием;
- повторные оперативные вмешательства;
- выполнение аугментация костной ткани для увеличения стабильности винтов;
- наблюдения с усталостными переломами компонентов транспедикулярного фиксатора;
- нарушение технологии установки транспедикулярных винтов и их повторное проведение в ходе операции.

2.5.1 Обследование пациентов с травматическими повреждениями**поясничного отдела позвоночника и переходной грудопоясничной области**

Обследование пациентов включало оценку неврологического статуса в соответствии с международными стандартами классификации неврологических нарушений [166]. У 130 пациентов (63,7%) не отмечено неврологической симптоматики (группа E), у 46 пациентов (22,5%) было нарушение чувствительности при сохраненной моторной функции (группа D), у 28 пациентов (13,7%) выявлен нижний парапарез в сочетании с чувствительными нарушениями (группа C). Для стандартизации наблюдений исключены пациенты с А и В групп, поскольку хирургическая тактика у этих пациентов может существенно отличаться, кроме того, эта группа имеет другой реабилитационный потенциал. В отдаленном периоде имеющийся неврологический дефицит может существенно

ограничить возможные физические нагрузки, что может значительно повлиять на результаты лечения.

Во всех случаях пациентам назначалась компьютерная томография, параметры КТ-сканирования были стандартными, в ходе исследования определялись морфологические особенности перелома и радиоденсивность губчатой костной ткани тела позвонка на неповрежденном уровне L3 или L2 по стандартной, ранее описанной методике. На основании данных КТ определялся тип повреждения в соответствии с АО-классификацией повреждений позвоночника груднопоясничной области [315].

2.5.2 Хирургическая тактика при травматических повреждениях поясничного отдела позвоночника и переходной груднопоясничной области

Пациентам была выполнена коррекция посттравматической деформации и открытая транспедикулярная фиксация с выполнением заднего спондилодеза за счет артродеза дугоотростчатых суставов. Использовалась стандартная техника транспедикулярной фиксации: винты устанавливались по прямой траектории, соосно ножке позвонка и параллельно верхней замыкательной пластине. Кросс-коннектор не применялся. Размер винтов был таким, чтобы они обязательно достигали передней трети тела позвонка. Бикортикальная установка винтов не использовалась. При отсутствии значимой посттравматической деформации использовалась короткая односегментарная или бисегментарная фиксация. Протяженная фиксация использовалась для коррекции посттравматической деформации. В зависимости от локализации компримирующего субстрата всем пациентам с неврологическими нарушениями (группы ASIA C, D) выполнялась микрохирургическая декомпрессия корешков и спинного мозга из дорзального, вентрального или комбинированного доступа. Реконструкция передней колонны проводилась при снижении высоты тела позвонка более, чем на 50,0%. В послеоперационном периоде всем пациентам была выполнена компьютерная томография, на которой оценивались выполненная декомпрессия, положение имплантатов и полнота коррекции посттравматической деформации.

Объем резекции костных структур и связок задней опорной колонны в ходе декомпрессии нами классифицирован следующим образом: двухсторонняя тотальная фасетэктомия с полным удалением межкостистой и желтой связок осуществлена 48 (23,5%) пациентам, 66 (32,4%) пациентам выполнялась ламинэктомия.

Тотальная резекция структур задней опорной колонны, сочетающая ламинэктомию и тотальную резекцию дугоотростчатых суставов выполнена 37 пациентам (18,1%).

Реконструкция передней колонны выполнена 76 пациентам (37,2%), из них 31 (15,1%) пациенту выполнена передняя декомпрессия спинного мозга и корешков, в ходе которой были удалены отломки позвонка, смещенные в позвоночный канал.

Всем пациентам была выполнена открытая транспедикулярная фиксация поврежденных сегментов, при этом, промежуточная фиксация (транспедикулярная фиксация с установкой винтов в сломанный позвонок) выполнена 93 (45,6%) пациентам. Короткая моносегментарная фиксация выполнена 10 пациентам (4,9%), бисегментарная фиксация – 139 пациентам (68,1%), 21 пациенту (10,3%) выполнено вмешательство на 3 сегментах, у 34 пациентов фиксация включала 4 сегмента (16,7%). Люмбосакральная фиксация выполнена 6 пациентам (2,9%).

Помимо вышеперечисленных, при выполнении анализа в том числе учитывался биомеханический фактор, обусловленный неполной коррекцией деформации. У 38 пациентов (18,6%) сохранялась остаточная деформация более 10°.

2.6 Оценка эффективности аугментации костной ткани при оперативных вмешательствах с применением транспедикулярной фиксации

Для изучения эффективности методик аугментации выполнено проспективное нерандомизированное сравнительное исследование.

Критерии включения:

- травматические повреждениями поясничного отдела позвоночника и грудопоясничного перехода типа OF4, OF5 на фоне остеопороза, группы C, D, E ASIA;
- дегенеративный стеноз позвоночного канала на фоне нестабильности сегмента, если интенсивность боли в пояснице и нижних конечностях превышала 40 баллов (шкала 0 – 100), а индекс ограничения жизнедеятельности Освестри 40,0%;
- признаки остеопороза по данным остеоденситометрии – Т-критерий менее –2,5; или снижение радиоденсивности губчатой костной ткани тел позвонков менее 110 HU.

Критерии исключения:

- спондилолистез 3, 4 степени;
- дегенеративная деформация, с нарушением сагиттального баланса (SVA>5 см, PI–LL>10), требующая применения позвоночно-тазовой фиксации или протяженной фиксации более 5 сегментов;
- конкурирующая патология – новообразованиями и воспалительными заболеваниями позвоночника.

Предоперационное обследование пациентов включало оценку неврологического статуса, оценку интенсивности боли по ВАШ, у пациентов с дегенеративной патологией позвоночника – оценку индекса ограничения жизнедеятельности Освестри.

2.6.1 Предоперационное обследование пациентов

Перед операцией всем пациентам была выполнена КТ поясничного отдела позвоночника по стандартному протоколу (см. раздел материалы и методы, раздел 2.3.2). Во время исследования всем пациентами определялась радиоденсивность на стандартном уровне L2 или L3. У пациентов с травматической патологией измерение проводилось на неповрежденном позвонке. Перед аугментацией

костной ткани позвонка полиметилметакрилатом, оценивалась морфология венобазиллярной системы. С этой целью оценивали морфологию передней стенки позвоночного канала, а именно: диаметр и расположение питающих отверстий, которые являются местом выхода из тела позвонка сосудов венобазиллярной системы. При наличии центрального питающего отверстия, диаметр которого не менее, чем в два раза превышает другие, тип строения венобазиллярной системы оценивали как магистральный (Рисунок 2.8А). Несколько отверстий с незначительно отличающимся диаметром свидетельствуют о дисперсном строении венозных коллекторов (Рисунок 2.8Б).

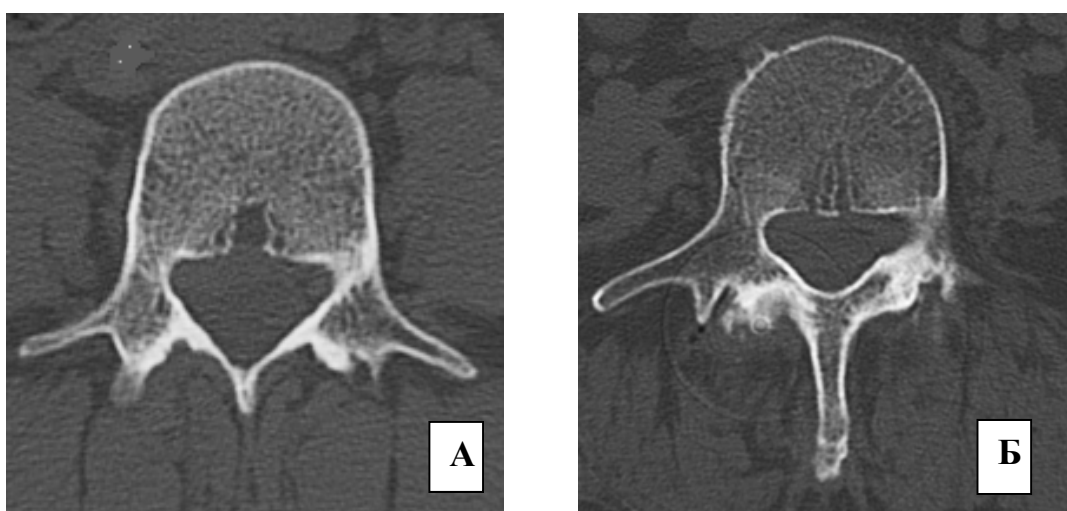


Рисунок 2.8 – Типы строения венобазиллярной системы магистральный (А), дисперсный тип (Б)

Дренирование цемента в позвоночный канал оценивалось как его отсутствие, мениск в области питающего отверстия и экстенсивное дренирование, когда цемент распространялся эпидурально за пределы питающего отверстия, в том числе по сосудистому руслу. Для оценки риска дренирования цемента измерялся диаметр питающего отверстия, используя логистический регрессионный анализ оценивалась связь с частотой экстенсивного дренирования в позвоночный канал. В случае, когда имелся дисперсный тип венобазиллярной системы, в качестве предиктора использовался наибольший диаметр питающего отверстия.

По используемой хирургической тактике пациенты разделены на следующие группы:

- группа 1 – пациенты, которым применялась транспедикулярная фиксация с аугментацией костной ткани цементом на основе полиметилметакрилата. Оперативное вмешательство выполнено 46 пациентам, из которых 16 – мужчины, 30 – женщины. Средний возраст пациентов в группе составил 61 год, $\sigma=11,17$; минимум 31, максимум 79. У 38 пациентов (82,6%) прослежены результаты в течение 18 месяцев. Из 38 пациентов 6 наблюдений были с дегенеративной патологией (15,7%).
- группа 2 – пациенты, которым выполнена транспедикулярная фиксация с применением разработанной технологии аугментации тел позвонков ауто- или аллокостью. Оперативное вмешательство выполнено 25 пациентам, из них – 6 – мужчины, 19 – женщины. Средний возраст составил 63 года, $\sigma=9,52$; минимум 39, максимум 78 лет. В течение 18 месяцев прослежены результаты у 21 пациента (84,0%), из них пациенты с дегенеративной патологией составили 5 наблюдений (23,8%), с травматической - 16 (76,2%);
- группа 3 – контрольная группа, составившая 118 пациентов, из них мужчины – 38 (32,2%), женщины – 80 (67,8%), средний возраст 58 лет, $\sigma = 10,8$; минимум – 42 года, максимум – 81 год. В течение 18 месяцев прослежены результаты у 93 пациентов (78,8%), из них с дегенеративной патологией - 23 (24,7%), с травматической – 70 (75,2%). Данные о результатах лечения в указанной группе также использовались в амбиспективном анализе результатов лечения пациентов с травматическими повреждениями поясничного отдела позвоночника и переходной грудопоясничной области.

2.6.2 Хирургическая тактика и техника аугментации

Пациентам с травматическими повреждениями позвоночника выполнена транспедикулярная фиксация с применением промежуточной фиксации, при снижении высоты тела позвонка более, чем на 50,0% выполнялся передний межтеловой спондилодез. При наличии неврологической симптоматики выполнялась декомпрессия из вентрального или дорзального доступа, если была

необходима реконструкция передней колонны и имела передняя локализация субстрата, то выполнялась передняя декомпрессия спинного мозга и корешков. Пациентам с дегенеративным стенозом позвоночного канала во всех случаях выполнялись микрохирургическая декомпрессия корешков и трансфораминальный межтеловой спондилодез. Оперативная техника отличалась от той, которая применялась для лечения пациентов с травматической и дегенеративной патологией только тем, что дополнительно выполнялась аугментация тел позвонков ПММА или аллокостью.

При аугментации ПММА использовались две техники – инъекция цемента через канюлированные винты и вертебропластическая техника аугментации. При вертебропластической аугментации полиметилметакрилатом транспедикулярно в тела позвонков проводились иглы Джамшиди до границы вентральной половины тела позвонка, после чего, в тела позвонков с каждой стороны вводилось по 2 мл костного цемента или «Vertecem V+», или «VertaPlex». После инъекции костного цемента иглы удалялись, и по каналам, сформированным иглами, транспедикулярно устанавливались винты, используя прямую траекторию соосную с ножкой позвонков, параллельно верхней замыкательной пластине. Такая техника применялась у 26 пациентов. У 20 пациентов аугментация выполнена через канюлированные фенестрированные винты Luna Double Medical или Osteomed. При выполнении этой техники также с каждой стороны на каждом уровне вводилось по 2 мл костного цемента.

Аугментация тел позвонков аутокостью выполнялась в соответствии с разработанным способом стабилизации позвоночно-двигательного сегмента транспедикулярным инструментарием у пациентов с остеопорозом позвоночника, (патент на изобретение «Способ стабилизации позвоночно-двигательного сегмента транспедикулярным инструментарием у пациентов с остеопорозом позвоночника» RU 2663940 C1, зарегистрирован в Федеральной службе по интеллектуальной собственности Российской Федерации, опубликован: 13.08.2018 Бюл. № 23). Способ был модифицирован также для выполнения минимально инвазивной фиксации с аугментацией, (патент на изобретение «Способ стабилизации

позвоночно-двигательного сегмента минимально инвазивным транспедикулярным инструментарием у пациентов с остеопорозом позвоночника» RU 2742593 С1, зарегистрирован в Федеральной службе по интеллектуальной собственности Российской Федерации, опубликован: 08.02.2021 Бюл. № 4). Основные этапы разработанного минимально инвазивного способа продемонстрированы на Рисунке 2.9.

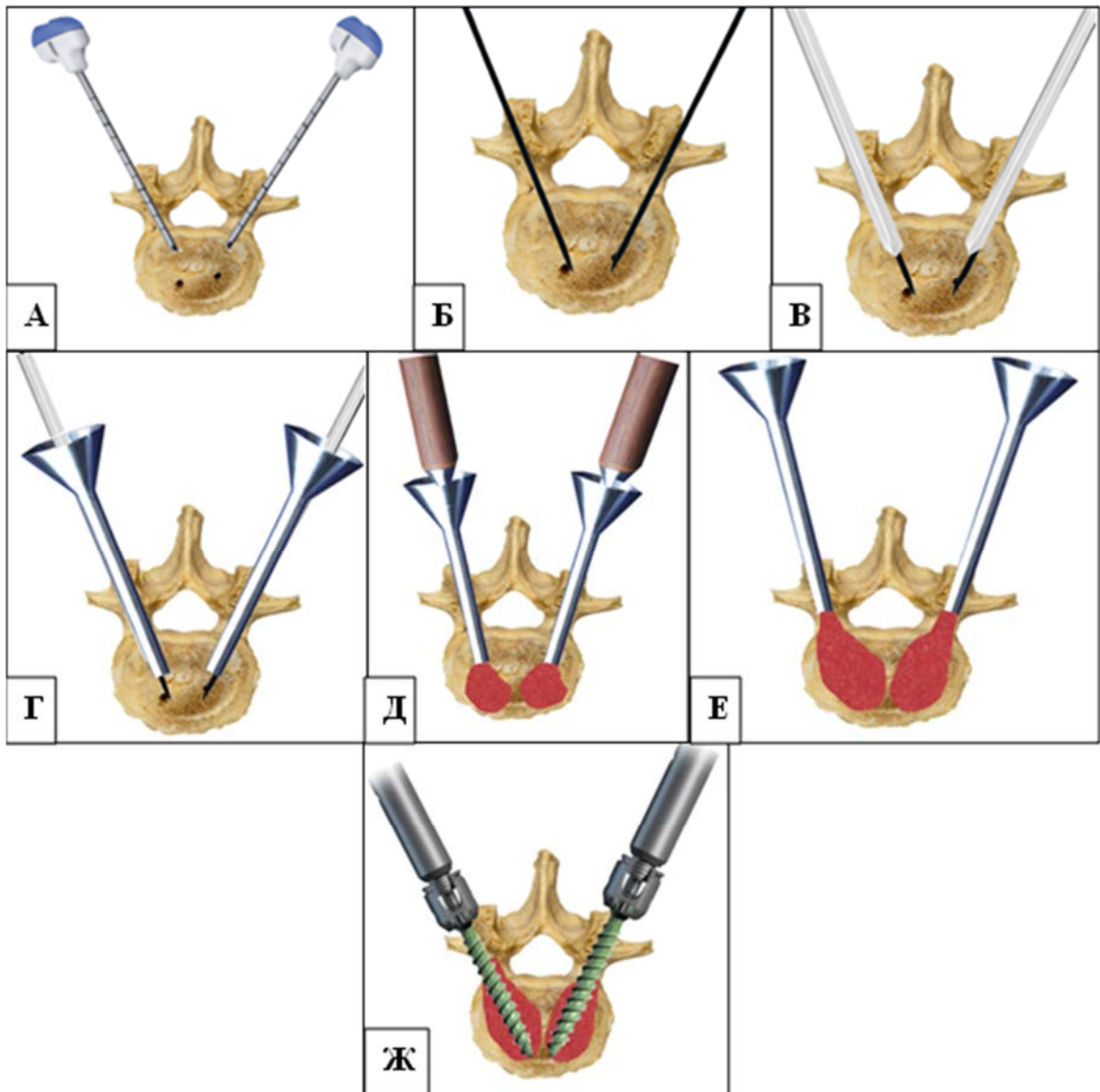


Рисунок 2.9 – Основные этапы разработанного способа аугментации: установка игл Джамшиди в тело позвонка (А), установка проводников через иглы Джамшиди (Б), установка дилататоров мягких тканей по проводнику (В), установка костных воронок в тело позвонка (Г), импактирование костных чипсов в тело позвонка (Д), аугментация ножек позвонка (Е), установка винтов (Ж)

При выполнении способа через ножки позвонков формируют каналы в тела позвонков, через которые поочередно с каждой стороны на каждом уровне вводят костную воронку, контролируют ее положение при помощи флюороскопии, костная воронка должна находиться в пределах тела позвонка. После установки костной воронки в тела позвонков импактором вводятся костную крошку, которая уплотняется в области планируемого введения транспедикулярных винтов. После завершения формирования уплотненной костной ткани в телах позвонков, костной крошкой заполняются ножки позвонков. Повторно транспедикулярно формируются каналы, через которые проводятся в тела позвонков винты.

Послеоперационное обследование этой группы пациентов отличалось тем, что в раннем послеоперационном периоде выполнялись контрольные КТ и кроме контроля положения имплантатов, полноты декомпрессии, адекватности выполнения аугментации оценивалось наличие таких осложнений, как дренирование цемента в позвоночный канал (миграция материала в случае аугментацией костью) и легочная цементная эмболия. При оценке дренирования в позвоночный канал учитывались только случаи с экстенсивным дренированием цемента, поскольку лишь данные случаи ассоциированы с риском развития неврологических нарушений. Если выполнялась аугментация костной ткани цементом, в послеоперационном периоде, пациентам проводилась рентгенография грудной клетки для диагностики цементной легочной эмболии.

2.7 Послеоперационное наблюдение пациентов

Протокол послеоперационного наблюдения был стандартным во всех группах. Контрольный осмотр проводился в сроки 3, 6, 12, 18 месяцев. Как правило, формирование костного блока происходит в течение 6 – 12 месяцев, следовательно, срок наблюдения 18 мес. является достаточным [88]. После того, как костный блок сформирован, клинически значимая дестабилизация имплантатов маловероятна. Во время каждого контрольного осмотра применялось обследование с применением визуально-аналоговой шкалы боли (ВАШ) и оценкой индекса ограничения жизнедеятельности Освестри. В срок 3 месяца выполнялась обзорная

спондилография области оперативного вмешательства. Если у пациента сохранялась корешковая симптоматика, назначалась МРТ поясничного отдела позвоночника. При увеличении интенсивности аксиального болевого синдрома назначались функциональные рентгенограммы позвоночника и КТ поясничного отдела позвоночника для оценки стабильности имплантатов. В срок 6 и 12 месяцев выполнялись контрольные КТ для оценки формирования костного блока. Оценка межтелового спондилодеза проводилась в соответствии с классификацией G. Tap (2007) [100]. Соответственно этой классификации, при степени формирования костного блока 1 происходит формирование спондилодеза на всей площади соприкосновения с верхней и нижней замыкательной пластиной с отчетливым формированием костных трабекул между трансплантатом и костной тканью позвонка. При степени 2 формируется костный блок не на всей площади соприкосновения трансплантата и тел позвонков, но частичное сращение имеется как с верхним, так и с нижним позвонком, также если не выражено формирование трабекул между трансплантатом и телами позвонков. Степень 3 – униполярный спондилодез, когда сращение происходит только с одним из тел позвонков. Степень 4 – полностью не происходит остеоинтеграция трансплантата, отсутствует непрерывность трабекуляции как в области контакта с верхним, так и с нижним позвонком оперированного ПДС. Для оценки заднего костного блока при выполнении артродеза дугоотростчатых суставов использована классификация, в которой определены 3 степени его формирования. При первой степени происходила полная облитерация полости дугоотростчатых суставах. При второй степени формирования костного блока анкилозирование происходило частично, и на ограниченном протяжении полость сустава прослеживалась. При третьей степени формировался псевдоартроз с прослеживающейся на всем протяжении суставной щелью [22, 98, 158, 167]. В срок 18 месяцев проводился неврологический осмотр, исследование с применением визуально-аналоговой шкалы боли (ВАШ) и оценкой индекса ограничения жизнедеятельности Освестри. КТ выполнялась, если формирование спондилодеза не было завершено к 12 месяцу наблюдения. Критерием нестабильности имплантатов было формирование

рентгенпрозрачной области вокруг винтов не менее 1 мм или признак «двойного контура» (наличие зоны резорбции, окруженной склерозированной костью, рисунок 2.9), а также поломка или разобщение компонентов фиксатора по результатам КТ [231]. Дестабилизация имплантатов считалась клинически значимой, если это сопровождалось увеличением аксиальной боли, и, если отсутствовали признаки сформированного переднего или заднего костного блока на уровне оперированных сегментов (степень 3 или 4 формирования переднего костного блока), а также при нарастании локальной деформации позвоночника более 10°. В этом случае пациентам выполнялось ревизионное оперативное вмешательство, направленное на стабилизацию оперированных сегментов.

2.8 Разработка хирургической тактики и техники оперативных вмешательств у пациентов с несостоятельностью транспедикулярной фиксации

Этап исследования представляет собой серию наблюдений. Включены пациенты, которым выполнялось ревизионное вмешательство по причине дестабилизации транспедикулярного фиксатора. Какой-либо статистический анализ является неприменимым в этом случае, поскольку стандартизация наблюдений невозможна и техника отличается от случая к случаю. Ревизионные оперативные вмешательства выполнены у пациентов, включенных во фрагмент работы, необходимой для оценки факторов риска дестабилизации транспедикулярного фиксатора при травматической и дегенеративной патологии, а также для изучения результатов применения техник, основанных на аугментации костной ткани.

Оперативное вмешательство выполнялось при наличии одновременно следующих критериев:

- Интенсивность боли ВАШ > 40 баллов, значение индекса ограничения жизнедеятельности Освестри более 40,0%;
- Признаки расшатывания винтов по данным КТ: зона резорбции костной ткани вокруг винтов более 1 мм или признак «двойного контура»;

- Признаки псевдоартроза после выполнения переднего спондилодеза 3 и 4 степень по классификации G.H. Tan (2007) и (или) псевдоартроз после выполнения заднего спондилодеза – 3 степень;
- Исключение иных источников боли.

Всего было выполнено 74 ревизионных вмешательства, что составляет 10,6% всех наблюдений.

2.9 Статистический анализ данных

Массивы данных представлены преимущественно в виде следующих шкал: в номинальной шкале, порядковой шкале (если данные разбиты на ранги и не учитывается количественная разница между субъектами шкалы), интервальной шкале (учитывается количественно разность между субъектами) и шкале отношений (шкала имеет нулевую точку отсчета). Частота дестабилизации имплантатов и повторных операций представлена в дихотомической шкале: наличие или отсутствия осложнения и ревизионных вмешательств. Для оценки значимости отличий двух пропорций применялся точный тест Фишера, который имеет преимущества, так как он устойчив при малых объемах выборки [178].

Для изучения зависимости между переменными, когда зависимая представлена в дихотомической шкале, применялось нелинейное оценивание – логистическая регрессия. Этот метод предпочтителен, поскольку зависимая переменная принимает только 2 значения. В данном случае нет необходимости применять общую модель дискриминантного анализа. Логистическая регрессия оценивает не непосредственно пропорцию наблюдений, а шансы (отношение вероятности события к вероятности, что оно не произойдет), то есть величину $\text{шанс} = p/(1 - p)$. В линейной регрессионной модели предполагается, что зависимая переменная является линейной функцией независимых переменных: $y = \beta_0 + \beta_1 x$, но эта модель не пригодна для анализа бинарных данных, в этом случае будет нарушаться условие $0 < p < 1$. В логистической регрессионной модели это преодолевается логарифмическим преобразованием с основанием натурального логарифма – e: $\ln(p/1 - p) = \beta_0 + \beta_1 x$. В данном случае x – независимая (объясняющая)

переменная β_0 и β_1 – параметры регрессионной модели. При множественной регрессионной модели вычисляются регрессионные коэффициенты для каждого предиктора. Для оценки параметров модели применялся метод максимального правдоподобия, квази-Ньютоновский алгоритм. При этом необходимо оценить регрессионный коэффициент β_0 (свободный член регрессионного уравнения), β_1 , $\beta_2 \dots \beta_x$ с оценкой 95,0% доверительного интервала и статистической значимости (значимость отличий от модели, не содержащей регрессионные коэффициенты). Незначимый регрессионный коэффициент свидетельствует об отсутствии связи между переменными. Также вычислялся 95,0% доверительный интервал для соотношения шансов. Если значение, равное 1, не входит в 95,0% доверительный интервал, то связь между переменными также не является значимой статистически [69, 236]. Для оценки качества классификации модели применялся анализ ROC-кривыми. Особенно важен этот анализ при необходимости найти значение предиктора, наилучшим образом классифицирующий наблюдения (с наилучшей дискриминантной функцией). Наилучшими операционными характеристиками обладает регрессионное уравнение с максимальной площадью под ROC-кривой [204].

При необходимости вычислить дискриминантную функцию для нескольких классов объектов, когда зависимая переменная представлена не количественным, а номинальным значением, применялся ядерный дискриминантный анализ или обобщенная модель дискриминантного анализа. Выбор обобщенной модели дискриминантного анализа обусловлен тем, что предикторы представлены как в непрерывной, так и в дихотомической шкале. При проведении анализа оценивается расстояние Махалонобиса между центроидами групп и его статистическая значимость, чем больше расстояния, тем меньше вероятность ошибки классификации. Вычисление дискриминантной функции основано на минимизации коэффициента λ Уилкса, чем ближе значение к нулю, тем лучше дискриминация наблюдений. Критерием различения при этом, является F-критерий, который вычисляется как отношение межгрупповой дисперсии к объединенной внутригрупповой дисперсии. Чем больше это отношение, тем

существенное различие между средними значениями в группах, как результат – переменная вносит наибольший вклад в дискриминантную функцию. На основании величины и статистической значимости вклада переменной в дискриминантную функцию осуществляется ее включение в расчетную функцию. В ходе анализа получают уравнения дискриминантной функции, учитывающее вклад каждого значимого предиктора, позволяющее отнести объект наблюдения к определенному классу. На заключительном этапе оценивается качество классификационной матрицы путем сопоставления расчетного и фактического распределения объектов по группам.

Для тестирования гипотезы сдвига при значимом отклонении от нормального распределения применялись непараметрические методы статистики: для парных данных – критерий Уилкоксона, для непарных данных – критерий Манна-Уитни. При нормальном распределении данных (для тестирования на нормальность применялся тест Шапиро-Уилка), проводилось интервальное оценивание с вычислением границ 95,0% доверительного интервала для значения исследуемого параметра. Если сравниваемые доверительные интервалы не имеют общих значений, то имеется отличие со статистической значимостью, как минимум $p < 0,05$. Более точное тестирование гипотезы о сдвиге выполнялось с применением t-критерия Стьюдента. Обязательным условием для применения t-критерия Стьюдента является гомогенность дисперсий. Для тестирования дисперсий на однородность применяются тест Бартлетта, тест Левена и тест Брауна-Форсайта. Тест Бартлетта предпочтителен, но он очень чувствителен к малейшему отклонению от нормальности, тесты Левена и Брауна-Форсайта более устойчивы к асимметрии и к сдвигу в сторону распределения Коши [286]. При неоднородности дисперсий для тестирования гипотезы сдвига применялся тест Аспин-Уэлча.

Для оценки связи переменных между собой при соблюдении условия нормального распределения данных применялся множественный линейный регрессионный анализ. В ходе анализа вычислялись общий коэффициент корреляции модели, статистическая значимость модели и анализ ее общей пригодности, для каждой объясняющей переменной в множественной модели

вычислялись бета коэффициенты и их значимость, которые отражают удельный вклад переменной в регрессионную модель. В завершении проводился анализ регрессионных остатков. Если распределение регрессионных остатков не отличалось от нормального, то не предполагается наличие дополнительных эффектов. Если объясняющие переменные представлены в непрерывной и дихотомической шкалах, то применялась общая модель регрессионного анализа-ковариационный анализ (ANCOVA), принцип анализа модели такой же, как и при множественной линейной регрессии.

При планировании фрагментов исследования и для оценки наблюдаемого эффекта апостериорно применялся расчет мощности методом Монте-Карло [337]. Для определения закона распределения данных с целью дальнейшего расчета мощности при распределении отличном от нормального, для его идентификации применялись критерии согласия χ^2 , Ω_2 Андерсона-Дарлинга и Колмогорова-Смирнова.

Для обработки данных использованы статистические программы: Statistica 12.0, KyPlot V2.0, EasyFit 5.2, PASS 2008. SPSS 12.

ГЛАВА 3 ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КОСТНОЙ ТКАНИ В КЛИНИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ И ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ РАЗВИТИЯ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ИМПЛАНТАТОВ

Как известно, нарушение плотности костной ткани считается основной причиной дестабилизации имплантатов, поэтому при планировании операции необходима оценка ее качества. В настоящее время для оценки свойств костной ткани все большую популярность приобретает измерение радиоденсивности костной ткани в единицах Хаунсфилда (HU или Hounsfield Unit, англ.), поскольку этот параметр коррелирует с частотой низкоэнергетических переломов [17]. Тем не менее, остается вопрос: насколько воспроизводимы результаты упомянутого исследования и можно ли этот опыт экстраполировать на прогнозирование дестабилизации имплантатов.

3.1 Построение модели риска низкоэнергетических переломов на основании радиоденсивности губчатого вещества тел позвонков по данным КТ – характеристики исследования

Для разрешения имеющихся противоречий на первом этапе в ходе поперечного исследования решено повторно оценить взаимосвязь механической прочности губчатой костной ткани тел позвонков и ее радиоденсивности. С этой целью проанализированы результаты КТ-исследований 100 пациентов в возрасте старше 40 лет, которым исследование проводили в связи с впервые возникшими болями в поясничном отделе позвоночника и была оценена прогностическая значимость радиоденсивности в отношении развития низкоэнергетических переломов позвонков. В исследуемой группе было 83 (83,0%) женщины и 17 (17,0%) мужчин.

Возрастная характеристика пациентов и средняя костная плотность позвонков представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Возраст исследуемых пациентов и средняя радиоденсивность костной ткани

N=100	Среднее значение	Среднеквадратичное отклонение	Максимум	Минимум
Возраст, годы	70,5916 ± 0,7104	7,1040	86	49
Средняя радиоденсивность, HU	86,7867 ± 3,9985	39,9847	237,3333	-14,0000

Были исключены пациенты с высокоэнергетической травмой и пациенты с поражением позвонков новообразованиями. Компьютерная томография и оценка радиоденсивности проводилась по стандартному протоколу (см. главу 2. «Материалы и методы»). Для оценки патологических переломов применяли полуколичественную оценку по Н. К. Genant [156].

Статистический анализ данных

Прогностическая значимость радиоденсивности губчатой кости тел позвонков в отношении риска патологического низкоэнергетического перелома оценивалась с помощью логистического регрессионного анализа, зависимая переменная – наличие у пациента низкоэнергетического перелома, предиктор – радиоденсивность в HU.

3.1.1 Результаты построения модели риска низкоэнергетических переломов на основании радиоденсивности губчатого вещества тел позвонков по данным КТ

Частота выявленных патологических компрессионных переломов в исследуемой группе составила 37 (37,0% наблюдений). Логистический регрессионный анализ показал значительную связь между снижением костной плотности позвонков и нарастанием частоты выявления патологических компрессионных переломов. Получены следующие параметры логистической регрессионной модели: $B_0 = 6,6473$, $p < 0,0001$; $B_1 = -0,0941$, $p < 0,0001$. Отношение шансов на единицу изменения предиктора 1,0987; 95,0% CI [1,1413; 1,0575]. Общая

пригодность модели: $\chi^2 = 71,4068$; $p < 0,0001$. Модель правильно классифицирует 85,0% наблюдений с чувствительностью 81,1 и специфичностью 87,3%. Таким образом, результаты исследований зависимости частоты выявления низкоэнергетических переломов от радиоденсивности в НУ воспроизводимы. Точность классификации 85,0% позволяет сделать вывод, что на основании этого параметра эффективна оценка механических свойств костной ткани.

3.2 Построение модели риска расшатывания транспедикулярного фиксатора на основе радиоденсивности – характеристика исследования

Учитывая данные, что радиоденсивность коррелирует с механической прочностью губчатой кости тел позвонков можно предположить, что этот параметр применим и для прогнозирования расшатывания винтов у пациентов, оперированных с применением транспедикулярной фиксации. Для того, чтобы оценить, пригодна ли радиоденсивность в качестве независимого предиктора расшатывания винтов, была сформирована выборка из 535 пациентов, из них 204 были с травмами поясничного отдела позвоночника и грудопоясничного перехода, а 331 с дегенеративной патологией. Характеристика группы пациентов представлена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Возраст исследуемых пациентов и средняя радиоденсивность костной ткани

N=535	Среднее значение	Среднеквадратичное отклонение	Максимум	Минимум
Возраст, годы	53,4745 ± 0,6475	11,7808	79	18
Средняя радиоденсивность, НУ	131,5435±1,9010	44,2979	299,3000	26,7333

Радиоденсивность губчатого вещества тел позвонков определялась по результатам предоперационных КТ по стандартной методике (см. главу 2. «Материалы и методы»). Пациентам выполнялись декомпрессивно-стабилизирующие вмешательства с применением транспедикулярной фиксации. В

ходе выполнения анализа не учитывались особенности хирургической техники, патологии и свойства имплантатов. Минимальный срок наблюдения составил 18 месяцев, схема обследования пациентов в послеоперационном периоде представлена в главе 2. Материалы и методы. Критерием расшатывания винтов были или рентгенпрозрачная область вокруг винтов не менее 1 мм, или признак «двойного контура».

Статистический анализ данных

При оценке прогностической значимости радиоденсивности в отношении риска расшатывания транспедикулярных винтов применялся логистический регрессионный анализ (частота расшатывания винтов – зависимая переменная, радиоденсивность – предиктор).

3.2.1 Результаты построения модели риска расшатывания транспедикулярного фиксатора на основе радиоденсивности

За время наблюдения у 164 пациентов были отмечены рентгенологические признаки расшатывания винтов (31,2% наблюдений). При выполнении логистического регрессионного анализа получена статистически значимая модель, общая пригодность: $\chi^2 = 35,6373$; $p < 0,0001$. Параметры модели были следующими: $B_0 = -0,9800$; $p = 0,0024$, $B_1 = 0,0139$; $p < 0,0001$; ОШ = 1,0140 (на единицу изменения предиктора), 95,0% CI [1,0091; 1,0140]. Модель правильно классифицировала только 68,6% наблюдений, чувствительность и специфичность составили 9,1% и 95,6% соответственно. Очевидно, что невысокая точность классификации обусловлена низкой чувствительностью модели.

Несмотря на то, что полученная модель, подтверждает зависимость частоты дестабилизации имплантатов от радиоденсивности губчатой кости тел позвонков в единицах Хаунсфилда, она не пригодна для оценки риска развития осложнения в клинической практике вследствие низкой чувствительности. Подводя итоги, можно сделать заключение: частота патологических компрессионных переломов и частота расшатывания винтов зависят от радиоденсивности костной ткани по

данным КТ, следовательно, этот параметр коррелирует с механическими свойствами костной ткани. Тем не менее, точность модели, полученной для оценки вероятности расшатывания транспедикулярных винтов существенно хуже, чем для прогнозирования низкоэнергетических переломов, несмотря на большой объем выборки. Возможной причиной наблюдаемых отличий эффективности классификации бинарных данных полученных моделей является то, что механические свойства костной ткани являются лишь одним из факторов, влияющих на расшатывание транспедикулярного инструментария. В гетерогенной группе без учета основной патологии, свойств имплантатов и особенностей хирургической техники, модели, основанные только на свойствах костной ткани недостаточно эффективны для прогнозирования дестабилизации транспедикулярного фиксатора.

3.3 Обсуждение результатов

Оценка свойств костной ткани имеет большое значение в клинической практике, поскольку снижение ее качества связано с риском патологических переломов и развитием нестабильности имплантатов после декомпрессивно-стабилизирующих вмешательств на позвоночнике [46, 128, 146, 247]. Несмотря на то, что уже длительное время ведутся исследования, направленные на разработку оценки риска развития нестабильности имплантатов и патологических переломов, не получены модели, позволяющие с необходимой точностью прогнозировать развитие этого осложнения.

По причине потенциального искажения результатов оценки костной ткани по результатам DXA за счет суммации рентгенпрозрачности различных структур позвонков, включая дугоотростчатые суставы, все большую популярность приобретает измерение радиоденсивности по данным КТ, позволяющее осуществить избирательную оценку губчатой костной ткани тела позвонка [16]. Достоинством метода, основанном на определении радиоденсивности, является также хорошая межэкспертная согласованность, независимая от методики измерения [336]. На данный момент существует все больше доказательств того, что

этот показатель сильно коррелирует с измерениями минеральной плотности кости и может иметь отношение к прогнозированию низкоэнергетического перелома, дестабилизации имплантата и формированию псевдоартроза. [17, 35, 43, 72, 146, 147, 149, 244]. С другой стороны, известно, что в ходе оперативных вмешательств могут применяться различные опции, повышающие стабильность транспедикулярной фиксации, следовательно, изучаемые группы пациентов могут быть очень разнородны. Как следствие, возникает вопрос, можно ли экстраполировать опыт прогнозирования низкоэнергетических переломов, основанный на радиоденсивности на прогнозирование имплантатзависимых осложнений.

С целью разрешения потенциальных противоречий оценена связь частоты спонтанных патологических переломов и радиоденсивности губчатой ткани позвонков в НУ. В итоге, даже на небольшой выборке из 100 пациентов получена регрессионная модель с рабочими характеристиками, пригодными для оценки риска патологического перелома позвонков. Результаты фактически подтверждают ранее опубликованные данные и свидетельствуют о воспроизводимости такого способа прогнозирования низкоэнергетических переломов [17]. Несмотря на распространенное мнение, что результаты радиоденсивности в НУ не калиброваны для оценки минеральной плотности костной ткани, в настоящее время имеется убедительное доказательство, что этот параметр практически детерминирован плотностью кальция в костной ткани, поскольку было вычислено регрессионное уравнение, позволяющее конвертировать радиоденсивность в плотность кальция [72]. Выявленная сильная корреляция радиоденсивности костной ткани и концентрации кальция объясняет наблюдаемую сильную связь радиоденсивности и частоты патологических переломов позвонков.

Полученная регрессионная модель для прогнозирования расшатывания транспедикулярных винтов, основанная только на радиоденсивности губчатой ткани тел позвонков значительно уступала по качеству той, которая была построена для прогнозирования низкоэнергетических переломов. Несмотря на то, что результаты регрессионного анализа доказывают, что есть связь частоты

расшатывания транспедикулярных винтов с радиоденсивностью губчатой костной ткани, рабочие характеристики модели не позволяют использовать ее для прогнозирования осложнений в клинической практике по причине очень низкой чувствительности. С другой стороны, полученная сильная корреляция радиоденсивности и частоты низкоэнергетических переломов, подтверждающая ранее опубликованное исследование, позволяет отвергнуть гипотезу, что этот параметр недостаточно коррелирует с механическими свойствами костной ткани. Можно предположить, что причиной отличия рабочих характеристик моделей для прогнозирования низкоэнергетических переломов позвонков и частоты расшатывания транспедикулярных винтов обусловлено множественностью факторов, влияющих на частоту осложнения после декомпрессивно-стабилизирующих вмешательств на позвоночнике. Таким образом, построение модели, основанной только на свойствах костной ткани, является необоснованным редукционизмом, что является ошибкой методологии [24]. Попытка учесть множество факторов для прогнозирования имплантатзависимых осложнений предпринята Chong Liu (2021), но полученная модель обладала умеренными рабочими характеристиками с площадью под кривой по данным ROC-анализа 0,722, что также недостаточно для применения в клинической практике. Ограниченная эффективность модели для прогнозирования дестабилизации транспедикулярного фиксатора, основанной только на радиоденсивности в HU диктует необходимость выявления дополнительных факторов, которые влияют на результаты лечения пациентов с посттравматическим и дегенеративным стенозом позвоночного канала.

ГЛАВА 4 ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СТАБИЛЬНОСТЬ ИНСТРУМЕНТАЦИИ У ПАЦИЕНТОВ С ДЕГЕНЕРАТИВНЫМ СТЕНОЗОМ ПОЗВОНОЧНОГО КАНАЛА

4.1 Характеристика и особенности исследования

С целью оценки факторов, влияющих на стабильность транспедикулярной фиксации у пациентов с дегенеративной патологией позвоночника выполнен амбиспективный анализ результатов оперативного лечения 331 пациента с дегенеративным стенозом на уровне поясничного отдела позвоночника и нестабильностью сегментов. Группа пациентов включала 106 мужчин, 225 женщин; средний возраст 61 год, $\sigma = 12,11$; 28 – 74 лет). Анализ проводился на основании результатов рентгенологических методов исследования. Минимальный срок послеоперационного наблюдения составил 18 месяцев. Согласие на участие в данном исследовании было получено от всех пациентов, применявшиеся методы соответствуют стандартам лечения пациентов с дегенеративными заболеваниями позвоночника.

Критерии включения пациентов в исследование:

- дегенеративный стеноз позвоночного канала на уровне поясничного отдела с признаками нестабильности сегмента;
- дегенеративный или истмический спондилолистез 1 – 2 ст. на уровне поясничного отдела позвоночника.

Показаниями к оперативному лечению были:

- клиника нейрогенной перемежающейся хромоты;
- значение индекса ограничения жизнедеятельности Освестри более 40,0% и интенсивность боли по ВАШ более 40 баллов при условии, что проведено консервативное лечение в полном объеме в течение 3 месяцев;

- наличие неврологического дефицита: парез мышц, чувствительные нарушения, нарушение функции тазовых органов, обусловленные стенозом позвоночного канала на уровне поясничного отдела позвоночника.

Критериями исключения были:

- спондилолистез 3, 4 ст.;
- пациенты с дегенеративной деформацией, нарушением сагиттального баланса ($SVA > 5$ см, $PI-LL > 10$), требующих позвоночно-тазовой фиксации или протяженной фиксации более 5 сегментов;
- признаки нарушения техники транспедикулярной фиксации и повторной установки винтов;
- пациенты с новообразованиями позвоночника.

Стандартное предоперационное обследование включало функциональную рентгенографию поясничного отдела позвоночника в вертикальном положении, МРТ и КТ поясничного отдела позвоночника. Критерием нестабильности была разница трансляции в сагиттальной плоскости при наклонах вперед и назад более 3 мм. В ходе КТ-исследования дополнительно определялась плотность костной ткани в НУ. КТ-сканирование (Aquilion 32, Toshiba corporation, Япония) проводили по стандартному протоколу.

Всем пациентам были проведены стандартные открытые декомпрессивно-стабилизирующие вмешательства в сочетании с различными видами спондилодеза: транспедикулярная фиксация в сочетании с задним спондилодезом, трансфораминальным межтеловым спондилодезом, передним спондилодезом ALIF или DLIF. При выполнении транспедикулярной фиксации использовались полиаксиальные винты, которые вводились, как минимум, до вентральной трети тела позвонка. Бикортикальная установка винтов использовалась только на уровне L5–S1. Транспедикулярная фиксация в сочетании с заднелатеральным спондилодезом (PLF) выполнена 41 (12,4%) пациентам; декомпрессия в сочетании с трансфораминальным межтеловым спондилодезом и ригидной транспедикулярной фиксацией применена у 184 (55,6%) пациентов.

Транспедикулярная фиксация со спондилодезом из вентрального доступа (DLIF или ALIF) была выполнена 106 (32,0%) пациентам. Пациенты, которым был выполнен ALIF или DLIF были объединены в одну группу, поскольку площадь опоры кейджей, применявшихся в ходе операции была равной и составила 1000 мм². Моносегментарное вмешательство выполнено 200 (60,4%) пациентам, бисегментарное – 96 (29,0%) пациенту, фиксация трех сегментов – 24 (7,2%) пациентам, вмешательство на четырех сегментах - 10 (3,0%) пациентам, одному пациенту (0,3%) выполнена операция с фиксацией пяти сегментов. У 158 (47,7%) пациентов в область фиксации был включен сегмент L5–S1. Объем резекции костных структур и связочного аппарата в ходе декомпрессии нами классифицирован следующим образом: 104 (31,4%) пациентам выполнена непрямая декомпрессия корешков без резекции задних структур позвонков и связочного аппарата. Односторонняя тотальная фасетэктомия произведена 140 (42,3%) пациентам, двухсторонняя тотальная фасетэктомия с полным удалением межостистой и желтой связок осуществлена 57 (17,2%) пациентам. У 64 (19,3%) пациентов декомпрессия сопровождалась ламинэктомией. Помимо вышеперечисленных учитывался биомеханический фактор, обусловленный неполной редукцией позвонка при спондилолистезе, что было выявлено у 59 (17,8%) пациентов при анализе послеоперационных КТ.

Послеоперационное наблюдение проводилось в сроки 3, 6, 12 и 18 месяцев. Через 3 месяца после операции выполнялась обзорная рентгенография поясничного отдела позвоночника в вертикальном положении. При подозрении на раннюю нестабильность имплантатов выполнялась КТ. Через 6 и 12 месяцев после операции выполнялась плановая КТ, а через 18 месяцев КТ выполнялась в случае отсутствия признаков формирования костного блока в срок 12 месяцев. Признаком нарушения стабильной фиксации ПДС по данным КТ являлось формирование рентгенпрозрачной зоны вокруг резьбовой части транспедикулярного винта шириной более 1 мм, или разрежение костной ткани вокруг винта, окруженное контуром остеосклероза – double halo sign [231].

Статистический анализ

Для определения значимости связи частоты развития рентгенографических признаков нестабильности транспедикулярного инструментария и изучаемых предикторов применялся логистический регрессионный анализ, использовалось программное обеспечение Statistica 12.

4.1.1 Результаты оценки факторов, влияющих на стабильность транспедикулярной фиксации у пациентов с дегенеративной патологией позвоночника

В группе, включенной в исследование, у 122 пациентов радиоденсивность костной ткани была ниже 110, что соответствует 90,0% вероятности выявления остеопороза. Рентгенологические признаки расшатывания транспедикулярных винтов за все время наблюдения зарегистрированы в 115 (34,7%) случаях, при этом клинически значимой нестабильностью имплантатов оказалась только у 47 (14,2%) пациентов. При анализе причин, влияющих на стабильность транспедикулярной фиксации учитывались: радиоденсивность, протяженность фиксации, остаточная передняя трансляция более 3 мм, люмбосакральная фиксация, фиксация без применения межтелового спондилодеза, применение кейджа большой площади опоры и резекция заднего опорно-связочного аппарата (ляминэктомия, односторонняя фасетэктомия, двухсторонняя фасетэктомия). Выполнен логистический регрессионный анализ. В качестве зависимой переменной в модель включены рентгенологические признаки расшатывания винтов, в качестве предикторов – вышеуказанные переменные. Выявлено, что частота расшатывания винтов увеличивается со снижением значения радиоденсивности и увеличением протяженности фиксации. Частота осложнения также увеличивалась при остаточной передней трансляции более 3 мм и после выполнения двухсторонней фасетэктомии. Следует отметить, что статистически значимым был эффект второго порядка – применение кейжей большей площади опоры для ALIF, DLIF у пациентов значительно снижало частоту расшатывания транспедикулярного фиксатора, если радиоденсивность губчатой кости была менее 140 HU.

Значимость этого фактора превышала влияние эффекта первого порядка – применение кейджей большей площади без учета радиоденсивности.

В итоге, получена статистически значимая регрессионная модель: $\chi^2 = 116,23$
 $p < 0,0001$. Параметры модели представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры обобщенной логистической регрессионной модели

Компонент регрессионного уравнения	Коэффициент и его статистическая значимость	Отношение шансов и его 95,0 % доверительный интервал
Свободный член	0,2492 p=0,7287	
Остаточная трансляция более 3 мм	0,8546 p=0,0152	2,3505 [1,1806; 4,6796]
Радиоденсивность, НУ	-0,0239 p<0,0001	0,9764 [0,9764, 0,9676]
Люмбосакральная фиксация	0,3647 p=0,2701	0,3646579 [0,7522; 1,4400]
Протяженность фиксации, количество сегментов	1,0440 p<0,0001	2,8407 [1,9067; 4,2322]
Фиксация без межтелового спондилодеза	0,7515 p=0,1084	2,1202 [0,8462; 5,3120]
Двухсторонняя фасетэктомия	0,9824 p=0,0252	2,6710 [1,1309; 6,3083]
Односторонняя фасетэктомия	0,0176 p=0,9658	1,0178 [0,4527; 2,2882]
Ляминэктомия	-0,3942 p=0,5333	0,6742 [0,1944; 2,2278]
Применение кейджей с большой площадью опоры при радиоденсивности менее 140 НУ	-1,1986 p=0,0223	0,3016 [0,1080; 0,8424]

Примечание: отношение шансов рассчитано на единицу изменения предиктора.

Операционные характеристики модели были: специфичность 88,4%, чувствительность 61,7 %, точность классификации наблюдений 79,1%. Ограничения операционных характеристик модели могут быть обусловлены неучтенными факторами, такими, как свойства имплантатов, использованных в ходе оперативных вмешательств.

Как отмечено ранее, из 115 пациентов с признаками расшатывания винтов только у 47 нестабильность была клинически значимой. Общим у этих пациентов было следующее: отсутствие признаков формирования как переднего, так и заднего костного блока (признаки псевдоартроза), как минимум, двухсторонняя дестабилизация винтов на одном уровне, расшатывание винтов в крайних точках по диагонали, и многоуровневая дестабилизация транспедикулярного фиксатора. При построении логистической регрессионной модели с такими же предикторами, при зависимой переменной – клинически значимой дестабилизации транспедикулярного фиксатора, также получена значимая регрессионная модель с общей пригодностью $\chi^2 = 116,23$, $p < 0,0001$. Параметры модели представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Параметры обобщенной логистической регрессионной модели

Компонент регрессионного уравнения	Коэффициент и его статистическая значимость	Отношение шансов и его 95,0 % доверительный интервал
Свободный член	-1,9111 p=0,0219	
Остаточная трансляция более 3 мм	0,4728 p=0,2968	2,3505 [1,6589; 3,9070]
Радиоденсивность, NU	-0,0239 p<0,0001	1,6044 [0,9764, 0,9676]
Люмбосакральная фиксация	-0,2161 p=0,6032	0,8056 [0,3558; 1,8240]
Протяженность фиксации, количество сегментов	0,8517 p=0,0002	2,3436 [1,5035; 3,6531]
Фиксация без межтелового спондилодеза	0,6401 p=0,1909	1,8967 [0,7256; 4,9583]
Двухсторонняя фасетэктомия	0,6101 p=0,3119	1,8406 [0,5628; 6,0194]
Односторонняя фасетэктомия	-0,4185 p= 0,3995	0,6580 [0,2480; 1,7462]
Ляминэктомия	0,6040 p= 0,2531	1,8294 [0,6480; 5,1653]
Применение кейджей с большой площадью опоры при радиоденсивности менее 140 NU	-2,6071 p=0,0180	0,0737 [0,0085; 0,6374]

Операционные характеристики модели были: специфичность – 92,0%, чувствительность – 39,3%, точность классификации наблюдений – 76,8%.

Таким образом, можно выделить факторы, которые приводят к клинически значимой дестабилизации: частота осложнений увеличивалась со снижением радиоденсивности и увеличением протяженности фиксации, если применялись кейджи с большой площадью опоры у пациентов с костной плотностью ниже 140 НУ, это снижало частоту осложнений. Потенциальными факторами, влияющими на стабильность транспедикулярного фиксатора, можно считать остаточную переднюю трансляцию более 3 мм и двухстороннюю фасетэктомию, которые статистически значимо влияли на частоту рентгенологических признаков расшатывания винтов, но не оказали значимого эффекта на частоту клинически значимых осложнений.

4.2 Влияние дизайна винтов на стабильность транспедикулярной фиксации – характеристика исследования

Для изучения потенциального эффекта дизайна транспедикулярных винтов выполнен амбиспективный анализ результатов оперативного лечения 175 пациентов с дегенеративным стенозом на уровне поясничного отдела позвоночника и нестабильностью сегментов. Группа пациентов включала 60 мужчин, 115 женщин (средний возраст 52 года, $\sigma = 12,11$; 28 – 74 лет). Анализ проводился на основании результатов рентгенологических методов исследования. Минимальный срок послеоперационного наблюдения составил 18 месяцев. Показания к оперативным вмешательствам и отбор пациентов был идентичен ранее проводившемуся исследованию по оценке факторов, влияющих на стабильность транспедикулярной фиксации у пациентов с дегенеративной патологией позвоночника. Тем не менее, с целью уменьшения количества переменных, введены дополнительные критерии включения: у пациента должны были в ходе оперативного вмешательства использоваться винты одинакового диаметра и дизайна. Исключены были пациенты, которым выполнялся межтеловой

спондилодез из вентрального доступа – DLIF или ALIF. Протокол предоперационного обследования, техника оперативных вмешательств (транспедикулярная фиксация в сочетании с трансфораминальным спондилодезом, задним спондилодезом или с их сочетанием) не отличались от ранее проведенного исследования по оценке частоты дестабилизации транспедикулярного фиксатора. Транспедикулярная фиксация в сочетании с заднелатеральным спондилодезом (PLF) выполнена 25 (14,3%) пациентам; декомпрессия в сочетании с трансфораминальным межтеловым спондилодезом и ригидной транспедикулярной фиксацией применена у 150 (85,7%) пациентов. Моноsegmentарное вмешательство выполнено 115 (65,7%) пациентам, бисegmentарное – 47 (26,9%) пациентам фиксация трех segmentов – 16 (9,1%) пациентам, вмешательство на четырех segmentах – 1 (0,6%) пациенту, кроме того, одному пациенту (0,6%) выполнена операция с фиксацией пяти segmentов. У 91 (52,0%) пациента в область фиксации был включен segment L5–S1. Объем резекции костных структур и связочного аппарата в ходе декомпрессии нами классифицирован следующим образом: 18 (10,3%) пациентам выполнена недестабилизирующая декомпрессия, резецировано менее 50,0% дугоотростчатых суставов. Односторонняя тотальная фасетэктомия произведена 108 (61,7%) пациентам, двухсторонняя тотальная фасетэктомия с полным удалением межкостистой и желтой связок осуществлена 46 (26,3%) пациентам. У 46 (26,3%) пациентов декомпрессия сопровождалась ламинэктомией. Помимо вышеперечисленного, учитывался биомеханический фактор, обусловленный неполной редукцией позвонка при спондилолистезе (выявлено у 38,0 – 21,7% пациентов). Для выполнения транспедикулярной фиксации использовались винты с конической резьбой, конической сердцевиной, цилиндрической резьбой и цилиндрической сердцевиной, а также винты с цилиндрической резьбой и конической сердцевиной. Винты имели или метрическую резьбу, или упорную.

Тип винтов, использовавшихся при выполнении транспедикулярной фиксации представлен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Параметры винтов, использовавшихся при выполнении оперативных вмешательств

Дизайн Винта	Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Винтовой шаг резьбы, мм	Тип резьбы	Количество
cyl/cyl	6,5	4,0	3,0	Упорная	6 (3,4%)
cyl/cyl	7,5	4,5	3,0	Упорная	9 (5,1%)
cyl/con	6,5	4,0	2,5	Упорная	40 (22,9%)
cyl/con	7,5	5,0	2,5	Упорная	4 (2,3%)
con/con	6,0	4,0	3,0	Метрическая	48 (27,4%)
con/con	7,0	4,5	3,0	Метрическая	5 (2,9%)
con/con	6,0	4,5	2,5	Метрическая	49 (28,0%)
con/con	7,0	5,5	2,5	Метрическая	14 (8,0%)

Протоколы наблюдения в послеоперационном периоде были идентичными тем, которые использовались при оценке факторов, влияющих на стабильность транспедикулярной фиксации у пациентов с дегенеративной патологией позвоночника на уровне поясничного отдела. Признаком нарушения стабильной фиксации ПДС по данным КТ являлось формирование рентгенпрозрачной зоны вокруг резьбовой части транспедикулярного винта шириной более 1 мм, или признак двойного контура – double halo sign [231].

Статистический анализ

Логистический регрессионный анализ использовался для оценки значимости связи частоты расшатывания винтов и потенциальных предикторов. Учитывая результаты ранее выполненной оценки факторов, влияющих на частоту расшатывания винтов у пациентов исключен ряд избыточных переменных: люмбосакральная фиксация и односторонняя резекция дугоотростчатых суставов.

4.2.1 Результаты оценки дизайна винтов на стабильность транспедикулярной фиксации

В группе, включенной в исследование, у 75 пациентов (42,9%) радиоденсивность костной ткани была ниже 110 HU, что соответствует 90,0% вероятности выявления остеопороза. Рентгенологические признаки расшатывания транспедикулярных винтов за все время наблюдения зарегистрированы в 71

(40,6%) случае, при этом, клинически значимой нестабильность имплантатов оказалась у 29 (16,6%) пациентов. Частота расшатывания винтов увеличивалась при снижении радиоденсивности губчатой костной ткани тел позвонков, при увеличении протяженности фиксации и при выполнении двухстороннего тотального удаления дугоотростчатых суставов. Помимо этих факторов, параметры винтов также влияли на стабильность выполненной инструментации. Частота дестабилизации винтов уменьшалась при увеличении наружного диаметра, а также при уменьшении внутреннего диаметра и винтового шага резьбы. Тип резьбы и геометрия винта не влияли значимо на частоту дестабилизации фиксатора. В итоге получена статистически значимая общая логистическая регрессионная модель с общей пригодностью $\chi^2 = 64,5550$, $p < 0,0001$. Параметры расчетной регрессионной модели представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Параметры регрессионной модели

Компонент регрессионного уравнения	Коэффициент и его статистическая значимость	Отношение шансов и его 95% доверительный интервал
Свободный член	-4,8191 p=0,3617	
Радиоденсивность, HU	-0,0272 p<0,0001	0,9732 [0,9623; 0,9842]
Протяженность фиксации, количество сегментов	1,1116 p<0,0001	3,0394 [1,7566; 5,2590]
Фиксация без межтелового спондилодеза	-0,4247 p=0,4550	0,6540 [0,2128; 2,0097]
Двухсторонняя фасетэктомия	1,1249 p=0,4359	3,0798 [1,0023; 9,2781]
Ляминэктомия	0,4418 p=0,5333	1,5555 [0,5090; 4,7533]
Тип резьбы	-1,0342 p=0,9949	0,1070 [0,0090; 1,2659]
Геометрия cyl/cyl	0,1446 p=0,8568	1,1566 [0,2378; 5,6156]
Геометрия con/con	-1,7318 p=0,2767	0,1769 [0,0077; 4,0602]
Геометрия cyl/con	0,2719 p=0,7594	1,3124 [0,2282; 7,5451]
Наружный диаметр, мм	-5,9665 p=0,3798	0,0026 [0,000009; 0,7153]
Внутренний диаметр, мм	6,4307 p=0,0253	620,6100 [2,2363; 172234,6000]
Резьбовой шаг, мм	4,6117 p=0,0081	100,6538 [3,3668; 3009,1310]

Примечание: отношение шансов рассчитано на единицу изменения предиктора

Операционные характеристики модели были: специфичность – 86,5%, чувствительность – 67,6%, точность классификации наблюдений – 78,9%.

Результаты анализа позволяют сделать вывод, что параметры винтов также влияют на стабильность фиксации, что необходимо учитывать при оценке рисков дестабилизации транспедикулярного фиксатора. С учетом результатов исследования предложена полезная модель винта (Рисунок 4.1).

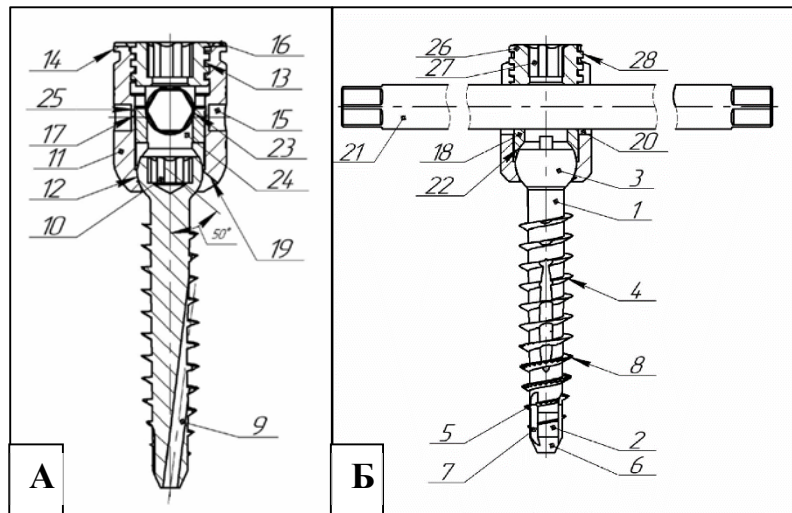


Рисунок 4.1 – Полезная модель винта: чертеж фрагмента смонтированной системы в аксиальной проекции (А), чертеж фрагмента смонтированной системы в сагиттальной проекции (Б)

Формула полезной модели:

Педикулярный винт, содержащий конусообразный стержень с резьбой и со сферической головкой, установленной в камертон, снабженный фиксатором, отличающийся тем, что нижняя часть стержня выполнена цилиндрической с заходными насечками и заходной фаской на конце, в стержне выполнено направляющее отверстие для позиционирования винта по направлятелю, в верхней части сферической головки расположено углубление под инструмент, в нижней части камертона выполнен вырез для наклона винта, а на наружной поверхности камертона выполнены глухие отверстия и буртик под захват инструментом (патент на полезную модель педикулярный винт RU 195876 U1, 07.02.2020. Заявка № 2019142325 от 18.12.2019).

4.3 Обсуждение результатов

Являясь распространенной патологией в пожилом возрасте, дегенеративные заболевания позвоночника становятся одной из наиболее частых причин компрессии корешков и спинного мозга, а также стойкого аксиального болевого синдрома, которые требуют применения декомпрессивно-стабилизирующих операций с применением транспедикулярной фиксации. В этой же группе пациентов часто встречается нарушение плотности костной ткани до уровня, соответствующего остеопении или остеопорозу, что существенно увеличивает риск оперативных вмешательств с применением имплантатов [146, 207, 265]. Результаты опубликованных работ свидетельствуют о том, что радиоденсивность имеет связь с частотой возникновения псевдоартроза после выполнения межтелового спондилодеза и с частотой расшатывания винтов, поэтому увеличивается популярность этого метода оценки качества костной ткани [336]. С другой стороны, уже длительное время проводится разработка методик, которые увеличивают прочность транспедикулярной фиксации, включая различный дизайн винтов, межтеловые имплантаты большой площади опоры, которые могут влиять на стабильность фиксации. Это в итоге не позволяет построить модель для оценки риска дестабилизации фиксатора только на основании оценки свойств костной ткани [36, 106, 130, 186].

Одним из наиболее важных факторов, влияющих на стабильность транспедикулярной фиксации, является ее протяженность. Влияние данного фактора неоднократно обсуждалось в ранее опубликованных работах. Корреляция частоты возникновения расшатывания винтов и протяженности фиксации объясняется увеличением плеча рычага в крайних точках фиксации, что приводит к увеличению нагрузки на имплантаты [207, 231, 307]. По результатам нашего исследования, увеличение протяженности фиксации существенно увеличивало частоту расшатывания винтов, оказывая эффект, сопоставимый с радиоденсивностью, отражающей прочность костной ткани.

До настоящего времени остаются противоречивыми данные о потенциальном биомеханическом эффекте применения кейджей большей площади

опоры и крайне редко обсуждалось потенциальное влияние техники декомпрессии корешков, в частности, объем резекции задних структур позвоночно-двигательного сегмента. Результаты выполненного исследования позволяют сделать вывод, что противоречия в ранее опубликованных работах обусловлены тем, что биомеханический эффект наиболее очевиден у пациентов с нарушением плотности костной ткани. Согласно результатам анализа, биомеханический эффект наиболее выражен у пациентов с радиоденсивностью менее 140 НУ. Объяснить наблюдаемый биомеханический эффект можно тем, что кейдж, установленный в ходе трансфораминального спондилодеза обеспечивает стабилизацию на ограниченном участке, а часто – только в центральной части межпозвонкового промежутка. Кейдж, использующийся для установки из вентрального доступа, за счет большей площади опоры уменьшает давление на прилежащую костную ткань, перераспределяя нагрузку на периферическую область тел позвонков, таким образом, увеличивая стабильность фиксации [49, 186, 311]. По этой же причине при оценке влияния хирургической тактики с выполнением только заднего спондилодеза без выполнения межтелового на стабильность транспедикулярного фиксатора, не выявлено значимых отличий по частоте его дестабилизации между этой группой пациентов и теми, кому выполнялся межтеловой спондилодез TLIF. Возможным объяснением данному факту является большое количество пациентов, у которых по данным радиоденсивности имелся остеопороз позвоночника. В этих условиях трансфораминальный спондилодез мог не обеспечить достаточную стабильность оперированного сегмента, что в итоге не дало значимого преимущества по сравнению с той группой пациентов, которым применялся только задний спондилодез.

Экстенсивность резекции структур задней опорной колонны также оказывала влияние на частоту дестабилизации транспедикулярного фиксатора. Наблюдаемому эффекту может быть два объяснения. По данным биомеханических исследований резекция костных структур заднего опорного комплекса (дуги, связок и дугоотррстчатых суставов) увеличивала объем движения сегментов позвоночного столба [119, 182, 289]. Принимая во внимание, что механизмом

расшатывания винтов является циклическая нагрузка, вызывающая микроподвижность винтов, дестабилизирующая декомпрессия может вызывать увеличение нагрузки в области контакта винтов и костной ткани, в итоге приводя к дестабилизации фиксатора [66]. Вторым потенциальным механизмом дестабилизации имплантатов является то, что избыточная резекция костных структур заднего опорного комплекса может препятствовать формированию дополнительного заднего костного блока, формирование которого не зависит от свойств костной ткани тел позвонков [22]. При отсутствии условий для формирования заднего спондилодеза, и если замедлено формирование переднего костного блока, то значительно увеличится риск дестабилизации фиксатора. По результатам нашего исследования односторонняя фасетэктомия и ламинэктомия не оказывали значимого эффекта на стабильность транспедикулярной фиксации в то время, как двухсторонняя фасетэктомия была значимым фактором, увеличивающим частоту расшатывания винтов.

Дополнительным фактором, который влиял на частоту расшатывания фиксатора, была неполная редукция позвонка при спондилолистезе. По результатам анализа, остаточная трансляция более 3 мм приводила к увеличению частоты дестабилизации транспедикулярного фиксатора. Несмотря на то, что пациенты со значимыми биомеханическими нарушениями, обусловленными неоптимальными позвоночно-тазовыми соотношениями, были исключены из исследования, это не исключает биомеханические нарушения в пределах оперированного и смежного сегментов при остаточной трансляции более 3 мм, что может приводить к увеличению нагрузки на винты, в итоге увеличивая частоту расшатывания.

Предполагалось, что люмбосакральная фиксация должна быть значимым фактором, приводящим к увеличению частоты дестабилизации транспедикулярных винтов в следствие анатомических особенностей крестца, тем не менее, по результатам исследования, данный фактор не был статистически значимым в исследуемой группе пациентов несмотря на то, что объем выборки и частота люмбосакральной фиксации были достаточными для выявления эффекта,

если бы он был статистически значимым. Наиболее вероятное объяснение такого несоответствия ранее опубликованным данным является то, что в гетерогенной группе пациентов с множественными степенями свободы влияние указанного фактора существенно уступало другим.

Одной из стратегий, направленных на увеличение стабильности транспедикулярной фиксации, является разработка оптимального дизайна винта. Возрастание площади контакта винта и костной ткани может быть достигнуто за счет увеличения наружного и уменьшения внутреннего диаметра. Площадь контакта винта и костной ткани можно увеличить также за счет уменьшения шага резьбы, что в итоге дополнительно увеличивает его стабильность в костной ткани. По результатам нашего исследования частота расшатывания транспедикулярных винтов уменьшается с увеличением наружного диаметра и уменьшением внутреннего диаметра, что согласуется с результатами ранее опубликованных биомеханических исследований. Винтовой шаг резьбы также оказал существенное влияние на увеличение прочности транспедикулярной фиксации. В настоящее время есть только два доступных варианта винтового шага резьбы: 2,5 и 3 мм. Результаты исследования демонстрируют, что винтовой шаг 2,5 мм предпочтителен, если необходимо дополнительное увеличение прочности фиксации, что необходимо учитывать при планировании операции. Предполагалось, что на прочность транспедикулярной фиксации также может влиять геометрия винта и тип резьбы, но по результатам анализа не выявлено статистически значимого влияния этих параметров на частоту дестабилизации транспедикулярных винтов. Объяснением может быть незначительный вклад влияния указанных факторов в общую регрессионную модель. Кроме того, влияние геометрии винта и типа резьбы может уменьшаться у пациентов с нарушением костной плотности.

Очевидно, что дизайн исследования имеет некоторые недостатки: построение модели с множественными переменными требует очень большого объема выборки, в связи с этим, изучение факторов, влияющих на стабильность винтов было необходимо проводить на двух группах пациентов, ограничивая количество факторов, которые могли бы повлиять на результат. Также, возможно,

на результат влияла коллинеарность некоторых переменных. Так, при оперативных вмешательствах с применением переднего доступа проводилась непрямая декомпрессия и редко выполнялась резекция связок и костных структур задней опорной колонны. Винты с цилиндрической резьбой и коническим сердечником имели упорную резьбу.

Тем не менее, результаты выполненного исследования доказывают, что факторы, влияющие на стабильность транспедикулярной фиксации нельзя упростить только до механической прочности костной ткани. Прогнозировать долгосрочные результаты можно только учитывая протяженность фиксации, необходимый объем резекции костных структур и связок заднего опорного комплекса. Также необходимо принимать во внимание биомеханический эффект, который может быть обусловлен неполной редукцией позвонка. Существенно снизить частоту дестабилизации транспедикулярного фиксатора позволит применение спондилодеза из вентрального доступа с применением кейджей большей площади, особенно, если радиоденсивность губчатой ткани ниже 140 HU. Также необходим выбор винтов, обеспечивающие максимальную площадь контакта с костной тканью, что достигается применением винтов с максимально возможной глубиной резьбы и меньшим винтовым шагом. При риске дестабилизации имплантатов следует избегать избыточной резекции структур заднего опорного комплекса с предпочтительным использованием непрямой декомпрессии. Безусловно, что непрякая декомпрессия не может применяться во всех случаях, следовательно, необходимо определить рациональные границы для применения такого технического решения.

ГЛАВА 5 НЕПРЯМАЯ ДЕКОМПРЕССИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПОНДИЛОДЕЗА ИЗ ВЕНТРАЛЬНОГО ДОСТУПА

Результаты оценки факторов, влияющих на стабильность транспедикулярного фиксатора, позволяют сделать вывод, что применение кейджей большей площади опоры уменьшает частоту дестабилизации имплантатов у пациентов с нарушением костной плотности. В то же время, целесообразно сохранить задние структуры фиксированного сегмента с целью формирования резервного заднего костного блока. Известно, что дополнительным эффектом вмешательства из вентрального доступа является непрямая декомпрессия корешков, приводящая к увеличению размеров позвоночного канала и регрессу компрессионного корешкового синдрома без непосредственного вмешательства на невральных структурах. В данном случае отсутствует необходимость резекции структур задней опорной колонны. В итоге можно сформулировать гипотезу, что непрямая декомпрессия с применением спондилодеза из переднего доступа позволяет достигнуть две цели: осуществить декомпрессию корешков и обеспечить максимальную стабильность оперированного сегмента. Безусловно, что такая методика не может применяться во всех случаях, и необходимо рациональное разграничение показаний к прямой декомпрессии с резекцией структур задней опорной колонны и непрямой декомпрессии. Ранее было доказано, что результаты КТ обладают большой специфичностью по отношению к пациентам с перемежающейся нейрогенной хромотой и двухсторонней радикулопатией, причем наибольшей прогностической значимостью обладали такие факторы, как глубина латерального рецессуса и площадь поперечного сечения позвоночного канала [7]. С другой стороны, неизвестны критические значения указанных параметров, которые помогли бы максимально эффективно разграничить показания для выполнения микрохирургической и непрямой декомпрессии.

Указанная задача достаточно сложна, и ранее выполненное исследование имеет недостаток: КТ проводилась в положении лежа, но в вертикальном положении не исключается значительное влияние динамического компонента, что не удастся учесть при заявленном дизайне исследования. При отборе пациентов для выполнения не прямой декомпрессии в настоящее время рекомендован клинический тест, основанный на динамике неврологической симптоматики при перемене положения тела [114]. По данным К.-Z. Lim и соавт. (2019), регресс неврологической симптоматики в положении лежа является благоприятным прогностическим признаком при выборе не прямой декомпрессии корешков спинного мозга. Очевидно, что в положении лежа исключается динамический компонент стеноза позвоночного канала, следовательно, отсутствуют степени свободы, которые невозможно учесть. В этом случае обосновано построение прогностической модели, оценивающей клинико-рентгенологические корреляции, основанные на данных КТ.

С целью уточнения показаний не прямой декомпрессии выполнены исследования на двух группах пациентов. Задачей первого фрагмента исследования являлось определение критических размеров позвоночного канала, обладающих максимальной чувствительностью и специфичностью в отношении неврологической симптоматики, обусловленной стенозом позвоночного канала. Задачей второго фрагмента исследования было оценить потенциальный эффект не прямой декомпрессии и факторы и определить апостериорно надежность выявленных критических параметров по данным КТ для прогнозирования результата оперативного лечения.

5.1 Оценка КТ параметров, имеющих прогностическое значение для клиники стеноза позвоночного канала – характеристика исследования

В исследование включено 104 пациента с моносегментарной патологией, которые проходили обследование по причине симптоматики, обусловленной дегенеративной патологией позвоночника. Среди пациентов 28 были мужчинами, 76 – женщинами. Средний возраст составил 60 лет, $\sigma=8,5092$; (максимум – 78 лет,

минимум – 22 года). С учетом ранее опубликованного исследования, исключены пациенты с монорадикулопатией, поскольку результаты КТ неспецифичны в отношении данной группы, и предполагается, что в этих случаях преобладает мягкотканый субстрат [7]. В исследование включены только пациенты с двухсторонней радикулопатией или клиникой нейрогенной перемежающейся хромоты. Из исследования были исключены пациенты с переломами, воспалительными, опухолевыми, инфекционными процессами и сколиотическими деформациями поясничного отдела позвоночника, превышающими 10° , с предшествующими хирургическими вмешательствами на позвоночнике, а также с нарушениями периферического кровообращения, симптомами артрозоартритов крупных суставов и полинейропатиями нижних конечностей. Среди пациентов, включенных в исследование не выявлено наблюдений с диаметром форамини менее 3 мм, что является критерием фораминального стеноза [215]. При неврологическом обследовании выявлялись пациенты, у которых неврологическая симптоматика в положении лежа регрессировала. Пациентам по стандартному протоколу проводилась КТ поясничного отдела позвоночника. В ходе исследования определялась глубина боковых каналов и площадь сечения позвоночного канала на уровне максимально выраженного сужения, поскольку по результатам ранее выполненного исследования только эти два параметра коррелируют с частотой клинических проявлений стеноза позвоночного канала. Указанные измерения выполнялись на срезах в аксиальной плоскости в области максимально выраженного сужения позвоночного канала. Если размеры латерального канала справа и слева отличались, то для анализа использовался наименьший размер бокового канала.

Статистический анализ

Для определения возможной связи результата клинического теста и морфологических параметров по результатам КТ применялся логистический регрессионный анализ. В качестве предикторов использовались минимальный размер бокового канала и площадь поперечного сечения позвоночного канала на

уровне максимально выраженного сужения. Для определения критических значений КТ параметров, максимально точно классифицирующих наблюдения, применялся логистический регрессионный анализ. Полученные модели с предполагаемыми критическими значениями площади позвоночного канала исследованы с применением ROC-кривых.

5.1.1 Результаты построения клинико-рентгенологической корреляции

В результате регрессионного анализа получена модель с одним прогностически значимым фактором – площадью поперечного сечения позвоночного канала (общая логистическая регрессионная модель), в то время как минимальный размер бокового канала не коррелировал с частотой регресса неврологической симптоматики в положении лежа. Результаты регрессионного анализа представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты логистического регрессионного анализа, оценивающего влияние КТ-параметров, коррелирующих с регрессом неврологической симптоматики в положении лежа

Компонент регрессионного уравнения	Коэффициент и его статистическая значимость	Отношение шансов и 95% доверительный интервал
Свободный член Уравнения	6,4609 p<0,0001	
Площадь поперечного сечения позвоночного канала, мм ²	-0,0460 p<0,0001	0,9550 [0,9381; 0,9723]
Минимальный размер бокового канала, мм ²	-0,3427 p=0,0967	0,7098 [0,4732; 1,0647]

Операционные характеристики модели были: специфичность – 82,2%, чувствительность – 88,1%, точность классификации наблюдений – 85,6%. Общая пригодность модели $\chi^2=71,4869$; p<0,0001. Исключение из регрессионной модели минимального размера латерального канала не изменяло модель статистически значимо (p=0,0803, метод максимума правдоподобия) и не меняло операционные

характеристики модели, это обусловлено преобладанием в группе пациентов с центральным стенозом позвоночного канала.

Получив модель с одной значимой переменной возможно вычислить пороговые значения, позволяющие максимально точно классифицировать наблюдения. Применяя анализ регрессионных уравнений с применением ROC-кривых, выявлено 3 значения с максимальной площадью под кривой, которые составили 80,26; 107,26 и 134,28 мм². Максимальной точностью классификации наблюдений обладало пороговое значение 80,2623. При использовании его как прогностического критерия при логистическом регрессионном анализе получена значимая модель с общей пригодностью $\chi^2=71,3949$; $p<0,0001$. Параметры модели: $B_0= -1,2192$; $p=0,0002$; $B_1= 5,0479$; $p<0,0001$. Операционные характеристики: специфичность 97,8%, чувствительность – 77,9%, точность классификации наблюдений – 86,5%, при анализе ROC-кривой площадь под ней составила 87,9; 95,0% CI [0,809; 0,949].

При использовании порогового значения площади поперечного сечения позвоночного канала 134,28 мм² получена модель с параметрами: $B_0= -2,5649$; $p=0,0007$; $B_1= 3,6636$; $p<0,0001$, общая пригодность модели: $\chi^2= 42,3995$; $p<0,0001$. Чувствительность полученной модели составила 96,7%, специфичность – 57,8%, точность классификации наблюдений – 79,8%, при анализе ROC-кривой, площадь составила 0,772; 95,0% CI [0,674; 0,870].

При построении модели с использованием порогового значения 107,26 мм² получена модель с площадью под кривой 0,841 с границами 95,0% CI [0,757; 0,924], чувствительность составила 88,1%, специфичность – 88,1%.

Выбор модели может быть обусловлен основной целью: необходимостью максимально точной дискриминации тех, у кого регрессирует неврологическая симптоматика в положении лежа, и тех, у кого она сохраняется. На основании выявленных критических значений площади позвоночного канала можно предположить, что если площадь позвоночного канала превышает 134,28 мм², то прямая декомпрессия не требуется. Модели с другими предполагаемыми критическими значениями позвоночного канала обладают разными

чувствительностью и специфичностью при сопоставимой точности классификации наблюдений. В итоге, остается неясной значимость этих отличий. Безусловно, размеры позвоночного канала будут изменяться в ходе операции, следовательно, необходимо вычисление моделей, пригодных для этого. Кроме того, необходимо апостериорно соотнести полученные критические значения площади сечения позвоночного канала с результатами не прямой декомпрессии.

5.2 Рентгенологические результаты не прямой декомпрессии с применением спондилодеза из вентрального доступа у пациентов с центральным стенозом позвоночного канала – характеристики исследования

Оценка результата не прямой декомпрессии выполнена на выборке из 80 пациентов, с нестабильным дегенеративным стенозом позвоночного канала, в том числе обусловленным дегенеративным спондилолистезом на уровне L3 – L4 и (или) на уровне L4 – L5, бисегментарная патология выявлена у 13 (16,2%) участников исследования. Пациентам была выполнена не прямая декомпрессия с использованием методики DLIF или ALIF.

Демографические характеристики группы были следующие: из 80 пациентов 17 мужчин, 63 женщин. Медиана для возраста составила 59 лет, границы верхнего и нижнего квартилей – 54 и 65 соответственно; минимум – 32, максимум – 72 года (распределение данных отличается от нормального, выполнялся тест Шапиро-Уилка, $p=0,0001$).

Критериями включения были:

- нестабильный дегенеративный стеноз позвоночного канала, в том числе обусловленный дегенеративным спондилолистезом на уровне L3 – L4 и (или) на уровне L4–L5;
- клиника нейрогенной перемежающейся хромоты или клиника компрессионной радикулопатии, обусловленная дегенеративным стенозом позвоночного канала;

- частичный или полный регресс неврологической симптоматики в положении лежа;
- значение индекса ограничения жизнедеятельности Освестри более 40,0% и если интенсивность боли по ВАШ в области поясницы или нижних конечностей была более 40 баллов (шкала 0 – 100 баллов) при условии, что проведено консервативное лечение в полном объеме в течение 3 месяцев.

Критериями исключения были:

- спондилолистез 3, 4 степени;
- дегенеративная патология, требующая оперативного лечения более, чем на 2 уровнях;
- истмический спондилолистез;
- пациенты, у которых неврологическая симптоматика оставалась без изменений в положении лежа (не регрессировала).

Стандартное предоперационное обследование включало функциональную рентгенографию поясничного отдела позвоночника в вертикальном положении, магнитно-резонансную томографию и КТ поясничного отдела позвоночника. Данные МРТ использовались для исключения пациентов с секвестрами диска в позвоночном канале, поскольку в этом случае требуется прямая декомпрессия. Критерием нестабильности по данным функциональных рентгенограмм была разница трансляции в сагиттальной плоскости при наклонах вперед и назад более 3 мм. При выполнении КТ определялись следующие параметры: площадь сечения позвоночного канала на уровне максимально выраженной компрессии, наличие вакуум-феномена в диске и дугоотростчатых суставах; выявленная 4 степень дегенерации дугоотростчатых суставов по Weishaupt и глубина боковых каналов справа и слева. Глубина боковых каналов и площадь сечения позвоночного канала измерялись на срезах в аксиальной плоскости на уровне максимально выраженного стеноза позвоночного канала. Также определялась трансляция верхнего позвонка, формирующего позвоночно-двигательный сегмент в сагиттальной плоскости,

высота диска по заднему и переднему краю по средней линии. Среди пациентов, включенных в исследование, не выявлено тех, у кого диаметр межпозвонкового отверстия был менее 3 мм, что является критерием для фораминального стеноза [215].

Всем пациентам выполнялась дискэктомия из вентрального доступа и передний спондилодез (DLIF или ALIF) с восстановлением высоты межпозвонкового промежутка, после чего выполнялась перкутанная транспедикулярная фиксация. Оперативное вмешательство по поводу бисегментарной патологии проведено 13 пациентам (16,2%). В послеоперационном периоде повторно назначалась КТ и повторно выполнялись те же измерения, проводилось сравнение предоперационных и послеоперационных значений площади позвоночного канала и глубины боковых каналов, оценивалось изменение трансляции в сагиттальной плоскости верхнего позвонка ПДС, если выполнялась редукция. В случае инструментации по поводу бисегментарной дегенеративной патологии указанные измерения проводились для каждого оперированного сегмента. В качестве предполагаемых переменных, влияющих на послеоперационные значения параметров КТ, для анализа использовались полнота редукции позвонка (разница трансляции в сагитальной плоскости до и после операции), изменение высоты диска по переднему и заднему краю по средней линии (разница значений после операции и до операции), наличие вакуум-феномена в диске и дугоотростчатых суставах по данным предоперационных КТ и степень дегенеративных изменений в дугоотростчатых суставах, соответствующая Weishaupt 4.

Статистический анализ

Для оценки эффекта не прямой декомпрессии использовалась описательная статистика: определялись абсолютное значение и процент приращения площади позвоночного канала на уровне максимальной компрессии, определялось изменение глубины латеральных каналов. Регрессионный анализ применялся для оценки зависимости послеоперационных параметров позвоночного канала и

потенциальных предикторов. Если регрессионная модель содержала только переменные в непрерывной шкале, то применялся линейный регрессионный анализ. Если модель содержала категориальные и непрерывные переменные, применялась общая модель – план ковариационного анализа. Для апостериорной оценки эффективности непрямой декомпрессии и оценки риска неудовлетворительных результатов применялся ядерный дискриминантный анализ.

5.2.1 Результаты исследования рентгенологических результатов непрямой декомпрессии с применением спондилодеза из вентрального доступа

При анализе выявлено, что объединение в один массив данных, измеренных для сегментов, где выполнялся спондилодез с редукцией позвонка и тех, где фиксация проводилась *in situ*, терялось нормальное распределение за счет формирования двух пиков, поэтому было решено разделить их по данному признаку.

Если при инструментации сегмента позвоночника выполнялась редукция, то, разница предоперационной и послеоперационной трансляции верхнего позвонка сегмента составила $3,0661 \pm 0,2530$ SD=1,9923, 95,0% CI [2,5602; 3,5721]. При анализе предоперационных КТ, вакуум-феномен выявлен на уровне 46 сегментов (74,2%), дегенеративные изменения, соответствующие степени 4 по Weishaupt – на уровне 13 сегментов (21,0%). После непрямой декомпрессии на уровне оперированного сегмента с применением редукции позвонка увеличилась высота диска в передних и задних отделах, площадь поперечного сечения позвоночного канала и глубина боковых каналов. Результаты оценки предоперационных и послеоперационных параметров по данным КТ представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Площадь поперечного сечения позвоночного канала и глубины боковых каналов до и после оперативного вмешательства на уровне оперированного сегмента, если выполнялась редукция позвонка

	Значение до операции	Послеоперационное значение	Статистическая значимость отличий
Площадь поперечного сечения позвоночного канала, мм ²	102,4468±8,6091 SD=67,7880 95,0% CI [85,2319; 119,6617]	150,3774±8,9059 SD=70,1252 95,0% CI [132,5689; 168,1859]	p<0,0001 тест Стьюдента
Глубина левого бокового канала, мм	3,90 [2,8; 4,8] 1,2-8,9	4,95 [3,7; 6,2] 2,2-9,6	p<0,0001 тест Вилкоксона
Глубина правого бокового канала, мм	3,45 [2,7; 5,0] 1,6-8,9	4,95 [3,8; 6,2] 2,5-15,0	p<0,0001 Тест Вилкоксона
Высота диска в передних отделах, мм	m=6,6677±0,3016 SD=2,3751 95,0% CI [6,0646; 7,2709]	m=12,0161±0,2734 SD=2,1531 95,0% CI [11,8693; 12,963]	p<0,0001 тест Стьюдента
Высота диска в задних отделах, мм	m=4,4500±0,2496 SD=1,9656 95,0% CI [3,9508; 4,9492]	m=7,1871±0,2749 SD=2,1649 95,0% CI [6,6373; 7,7369]	p<0,0001 тест Стьюдента

При оценке эффекта непрямой декомпрессии на уровне оперированного сегмента с выполнением редукции позвонка, выявлено, что медиана приращения площади поперечного сечения позвоночного канала составила 49,5%, 25,0 – 75,0% [22,35; 99,75], диапазон 0,5 – 99,7%. Медиана для разницы глубины правого бокового канала до и после операции составила 0,9 мм, 25,0 – 75,0% [0,4; 1,5], диапазон от –0,8 до 11,9 мм. Для разницы глубины левого бокового канала медиана составила 0,9 мм, 25,0 – 75,0% [0,3; 1,7%], диапазон от –1 до 4,1 мм.

Для оценки факторов, которые могут влиять на изменение площади позвоночного канала выполнен корреляционный анализ. При оценке корреляционной матрицы выявлено, что на послеоперационную площадь позвоночного канала не влияют данные, представленные в дихотомической шкале (наличие вакуум феномена и дегенеративных изменений стадии 4 по Weishaupt).

Таким образом, для прогнозирования площади позвоночного канала после операции оптимальным является уравнение линейной регрессии.

В результате анализа получена значимая регрессионная модель, общая пригодность: $r=0,8980$ ($R=0,8064$), $p<0,0001$. Вклад каждого предиктора в регрессионную модель представлен в таблице 5.3

Таблица 5.3 – Параметры линейной регрессионной модели для площади поперечного сечения позвоночного канала если выполнялась редукция позвонка при инструментации сегмента

Компонент регрессионного уравнения	Бета коэффициент	Регрессионный коэффициент	Статистическая значимость
Свободный член уравнения		39,2163	$p=0,0001$
Дооперационная площадь поперечного сечения позвоночного канала, мм ²	0,8486	0,8893	$p<0,0001$
Разница трансляции в сагиттальной плоскости, мм	0,1782	6,2508	$p=0,0029$
Разница высоты диска в передних отделах, мм	- 0,0302	- 0,7912	$p=0,6087$
Разница высоты диска в задних отделах, мм	- 0,0460	- 1,3984	$p=0,4312$

При анализе регрессионных остатков выявлено, что их распределение отличается статистически значимо от нормального; $p=0,0120$, использовался тест на нормальность Шапиро-Уилка, следовательно, предполагается наличие нелинейных эффектов. Тем не менее, регрессионная модель объясняет 80,6% доли дисперсии зависимой переменной, а относительная ошибка аппроксимации модели составила 16,0%, что свидетельствует об удовлетворительном качестве модели.

Если не выполнялась редукция позвонка, то на уровне оперированного сегмента отмечалось увеличение высоты межпозвонкового промежутка в передних и задних отделах, выявлено приращение площади поперечного сечения позвоночного канала и глубины латеральных каналов после оперативного

вмешательства. Предоперационные и послеоперационные значения представлены в таблице 5.4

Таблица 5.4 – Предоперационные и послеоперационные значения поперечного сечения позвоночного канала и глубины боковых каналов на уровне оперированного сегмента, если не выполнялась редукция позвонка

	До операции (среднее значение, стандартная ошибка среднего значения, среднеквадратичное отклонение, границы 95,0 % доверительного интервала)	После операции (медиана и границы верхнего и нижнего квартилей и диапазон)	Статистическая значимость отличий
Площадь поперечного сечения позвоночного канала, мм ²	105,1174±9,0735 SD=43,5149 95,0% CI [86,3001; 123,9346]	134,1957±9,4373 SD=45,2600 95,0% CI [114,6237; 153,7676]	p<0,0001 тест Стьюдента
Глубина левого бокового канала, мм	4,1391±0,3596 SD=1,7246 95,0% CI [3,3933; 4,8849]	5,6826±0,4181 SD=2,0051 95,0% CI [4,8155; 6,5497]	p=0,0001 Тест Стьюдента
Глубина правого бокового канала, мм	M=4,2 Диапазон 1,7 – 7,7 25,0 – 75,0% [3,1; 5,7]	5,5 Диапазон 2,3 – 15,0 25,0 – 75,0% [4,4; 7,4]	p=0,0001 Тест Вилкоксона
Высота диска в передних отделах, мм	M=8,4 Диапазон 1,8 – 11,7 25,0 – 75,0% [4,0; 10,0]	M=13,4 Диапазон 10,0 – 16,9 25,0 – 75,0% [11,9; 14,5]	p<0,0001 тест Вилкоксона
Высота диска в задних отделах, мм	m=4,6739±0,4234 SD=2,0305 95,0% CI [3,7959; 5,5520]	m=7,1522±0,4241 SD=2,0340 95,0% CI [6,2726; 8,0317]	p<0,0001 тест Стьюдента

Если не выполнялась редукция позвонка, то после не прямой декомпрессии с восстановлением высоты межпозвонкового промежутка приращение площади позвоночного канала составило: M=24,5% границы верхнего и нижнего квартилей [16,3%; 33,3%], диапазон: 3,1 – 214,9% (n=23), относительное приращение площади позвоночного канала было меньше, чем в тех случаях, когда выполнялась редукция

позвонка. Наблюдаемые отличия были статистически значимыми, $p=0,0108$, тест Манна – Уитни. Для приращения глубины левого бокового канала медиана составила 0,7 мм, диапазон 0 – 4,1 мм, 25,0 – 75,0% [0,2 – 3,4 мм]. Для приращения глубины правого бокового канала медиана составила 0,7 мм, диапазон –0,5 – 4,8 мм, 25,0 – 75,0% [0,4 – 1,8 мм]. Влияние не прямой декомпрессии на глубину бокового канала не отличалось, если выполнялась редукция позвонка или была выполнена стабилизация сегмента *in situ*, уровень статистической значимости составил $p = 0,8481$; $p = 0,8970$ для приращения глубины левого и правого бокового канала соответственно.

Для выявления факторов, которые влияют на изменение площади позвоночного канала инструментированного сегмента, если не выполнялась редукция позвонка, выполнен корреляционный анализ. При оценке корреляционной матрицы выявлено, что на послеоперационную площадь позвоночного канала также не влияют данные, представленные в дихотомической шкале. Таким образом, для прогнозирования площади позвоночного канала после выполнения не прямой декомпрессии также наиболее подходящим является уравнение линейной регрессии.

В результате анализа получена значимая регрессионная модель, общая пригодность: $r=0,9508$ ($R=0,9041$), $p<0,0001$. Вклад каждого предиктора и регрессионные коэффициенты представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Параметры линейной регрессионной модели для площади поперечного сечения позвоночного канала инструментированного сегмента, если не выполнялась редукция позвонка

Компонент уравнения	Бета коэффициент	Регрессионный коэффициент	Статистическая значимость
Свободный член уравнения		6,4119	$p=0,5567$
Дооперационная площадь поперечного сечения позвоночного канала, мм ²	0,9527	0,9968	$p<0,0001$
Разница высоты диска в передних отделах, мм	0,11073	1,8073	$p=0,1181$
Разница высоты диска в задних отделах, мм	0,1689	4,2827	$p=0,0287$

Регрессионные остатки имеют нормальное распределение $p = 0,6273$ (тест Шапиро-Уилка), относительная ошибка аппроксимации модели составила 8,2%, что говорит о хорошем качестве модели, несмотря на небольшой объем выборки.

По результатам анализа не получено качественной модели, пригодной для прогнозирования послеоперационных значений на уровне сегментов, где не выполнялась редукция позвонка. Для глубины правого бокового канала модель была незначимой статистически: $r = 0,5945$; $p = 0,0825$. В отношении глубины левого бокового канала получена статистически значимая регрессионная модель, но она не пригодна для прогнозирования: $r = 0,6689$; $R = 0,4461$; $p = 0,0246$. Единственным значимым предиктором в модели была предоперационная глубина левого бокового канала, регрессионный коэффициент составил 0,7814 с границами 95,0% доверительного интервала [0,2672; 1,2955]. Если объединить эти данные с результатами для сегментов, на которых проводилось редукция, то ухудшалось качество модели, иначе говоря, эффект не прямой декомпрессии в отношении глубины бокового канала наименее предсказуем, если не выполняется редукция позвонка. По указанной причине было решено отдельно построить модель для сегментов, на уровне которых выполнялась редукция позвонка. При оценке факторов, влияющих на послеоперационную глубину бокового канала получена значимая регрессионная модель (отдельно построены модели для правого и левого боковых каналов). Регрессионные модели содержат как непрерывные, так и категориальные переменные, поэтому был использован план ковариационного анализа. Общая пригодность модели для глубины левого бокового канала: $r = 0,7871$, $R = 0,6195$, $p < 0,0001$; для глубины правого бокового канала $r = 0,7068$, $R = 0,4996$, $p < 0,0001$. Параметры регрессионных моделей представлены в таблицах 5.6 и 5.7

Таблица 5.6 – Параметры регрессионной модели для глубины левого бокового канала после выполнения не прямой декомпрессии с редукцией позвонка

Компонент регрессионного уравнения	Бета коэффициент	Регрессионный коэффициент	Статистическая значимость
Свободный член уравнения		1,8432	$p < 0,0001$
Предоперационная глубина левого бокового канала, мм	0,7401	0,8139	$p < 0,0001$
Дегенеративные изменения дугоотростчатых суставов Weishaupt 4	0,1593	0,3940	$p = 0,0321$

Таблица 5.7 – Параметры регрессионной модели для глубины правого бокового канала после выполнения не прямой декомпрессии с редукцией позвонка

Компонент регрессионного уравнения	Бета коэффициент	Регрессионный коэффициент	Статистическая значимость
Свободный член уравнения		1,3199	$p = 0,0384$
Предоперационная глубина правого бокового канала, мм	0,6515	0,8145	$p < 0,0001$
Дегенеративные изменения дугоотростчатых суставов Weishaupt 4	0,1746	0,4954	$p = 0,0041$
Разница высоты диска по переднему краю до и после операции, мм	0,1886	0,1477	0,0384

Результаты анализа позволяют сделать заключение, что наиболее значимый фактор в регрессионной модели – предоперационное значение глубины бокового канала. После выполнения не прямой декомпрессии происходит приращение глубины бокового канала на постоянную величину (значимый свободный член уравнения).

Эффект больше выражен у пациентов с дегенеративными изменениями в дугоотростчатых суставах, соответствующих Weishaupt 4. Не исключается, что на изменение глубины бокового канала может влиять восстановление высоты межпозвонкового промежутка, поскольку значимым компонентом уравнения было изменение высоты диска в передних отделах. Несмотря на то, что полученные регрессионные модели позволяют сделать выводы о том, какие факторы влияют на послеоперационную глубину бокового канала, их пригодность для прогнозирования этого параметра сомнительна, поскольку процент объясненной

дисперсии для послеоперационных значений составил 61,9% для левого и 50,0% для правого бокового канала соответственно.

Подводя итоги, в результате не прямой декомпрессии происходит увеличение площади поперечного сечения позвоночного канала и глубины боковых каналов. Наиболее точно может быть спрогнозирована площадь поперечного сечения позвоночного канала: она зависит от исходного значения, от полноты редукции позвонка и от увеличения высоты межпозвонкового промежутка в задних отделах, причем эффект от редукции позвонка превышает тот, который наблюдается только при восстановлении высоты межпозвонкового промежутка. Значительно труднее прогнозировать изменение глубины бокового канала после не прямой декомпрессии: качество полученных регрессионных моделей значительно хуже, чем для площади поперечного сечения позвоночного канала, причем если выполняется стабилизация сегмента *in situ*, результат наименее прогнозируем. В итоге, наиболее точно можно спрогнозировать результат не прямой декомпрессии при центральном стенозе позвоночного канала, причем наиболее выраженный эффект ожидается у пациентов с нестабильным спондилолистезом.

5.3 Клинико-рентгенологические результаты оперативного лечения с применением не прямой декомпрессии

Всего было прооперировано 80 пациентов, из них оперативное вмешательство на двух уровнях применялось 13 пациентам. В послеоперационном периоде отмечен полный регресс неврологической симптоматики 18 (22,5%) пациентов, что соответствует отличному результату по шкале MacNub. Хороший результат отмечен у 23 пациентов (28,8%), у этих пациентов отмечались редкие нерадикулярные боли, незначительно ограничивающие жизнедеятельность, болевой синдром купировался однократным применением нестероидных противовоспалительных средств. В итоге, пациенты с хорошим и отличным результатом составили 51,2%. Неполный регресс радикулярной симптоматики отмечен у 30 пациентов (37,5%), это потребовало проведения реабилитационных

мероприятий, включающих медикаментозную терапию, ЛФК, ФТЛ. В итоге достигнуто существенное улучшение состояния – полностью восстановлена способность к самообслуживанию, но трудоспособность была ограничена легким физическим трудом. Следует отметить, что в этой подгруппе у 2 пациентов регресс болевого синдрома был достигнут выполнением радиочастотной абляции медиальных ветвей на нижнем смежном уровне. В этой же подгруппе было 10 пациентов, у которых длительность радикулярной симптоматики была более года, неполный регресс неврологической симптоматики может быть объяснен длительной компрессией корешков, следствием которой могут быть морфологические изменения. За время наблюдения у 1 пациента отмечалось прогрессирование дегенеративных изменений на нижнем смежном уровне с формированием нестабильности, что потребовало выполнить стабилизирующее вмешательство на сегменте. Тем не менее, спорной является интерпретация такого результата с отнесением к неудовлетворительным, поскольку ревизионное вмешательство на ранее оперированных сегментах не проводилось.

Неудовлетворительный результат отмечен у 10 (12,5%) пациентов. У них сохранялась болевая радикулярная симптоматика и ограничение индекса жизнедеятельности Освестри более 40,0%, интенсивность боли по шкале ВАШ более 40 баллов, тем не менее, все пациенты отмечали некоторое функциональное улучшение. У 4 из 10 у пациентов регресс болевого синдрома был достигнут за счет медикаментозной терапии (подбор обезболивания препаратами прегабалин, габапентин, тапентадола гидрохлорид, нестероидные противовоспалительные средства), эти пациенты отказались от выполнения повторных оперативных вмешательств. У одного пациента по данным КТ и МРТ выявлено, что площадь поперечного сечения позвоночного канала составляет 149 мм², а глубина боковых каналов превышает пороговое значение 3 мм, считающееся критерием для диагностики латерального стеноза. В этом случае корешковый болевой синдром был расценен как нейропатический.

В связи с сохраняющейся клиникой компрессионного корешкового синдрома 6 (7,5%) пациентам была выполнена прямая декомпрессия корешков с

применением тубусных ретракторов согласно патенту (патент на изобретение «Способ доступа к структурам различных отделов позвоночника и устройство для его осуществления» RU 2720709 С1, зарегистрирован в Федеральной службе по интеллектуальной собственности Российской Федерации, опубликован: 12.05.2020 Бюл. № 14), в итоге был достигнут регресс компрессионной корешковой симптоматики.

Ретроспективно был выполнен анализ причин неудовлетворительных результатов оперативного лечения с применением непрямой декомпрессии корешков, наилучшая дискриминантная функция получена в результате применения дискриминантного анализа Кернель – Фишера. В анализ включены следующие переменные: абсолютные значения глубин правого и левого боковых каналов, площадь поперечного сечения позвоночного канала по данным послеоперационных КТ. Также включены дихотомизированные переменные – сохраняющееся сужение позвоночного канала площадью менее 80 мм² и глубина бокового канала менее 3 мм независимо от стороны.

По результатам анализа очевидно, что возможна дискриминация наблюдений: расстояние Махалонобиса между центроидами групп было статистически значимым (квадрат расстояния составил 8,8064, $F = 14,6210$; $p < 0,0001$). Дискриминантная функция имела статистически значимый канонический корень, собственное значение 1,2667, коэффициент канонической корреляции $R = 0,7050$; $\lambda_{\text{Уилкса}} = 0,5030$; $\chi^2 = 51,8745$; $p < 0,0001$. Точность классификации достигла 92,5%, специфичность – 95,7%, чувствительность составила 70,0%. На качество классификации могла оказать влияние, в том числе, небольшая частота неудовлетворительных результатов.

В дискриминантной функции значимыми были только дихотомизированные переменные, параметры регрессионного уравнения представлены в таблице 5.8

По результатам анализа статистически значимыми в регрессионном уравнении были только дихотомизированные переменные: послеоперационная площадь позвоночного канала менее 80 мм² и глубина бокового канала менее 3 мм независимо от стороны. В итоге, очевидно, что установленное пороговое

значение площади позвоночного канала 80 мм² и глубина позвоночного канала менее 3 мм, считающаяся критерием латерального стеноза, могут считаться целевыми значениями при планировании не прямой декомпрессии позвоночного канала.

Таблица 5.8 – Параметры регрессионного уравнения дискриминантной функции для неудовлетворительных клинических результатов не прямой декомпрессии

Компонент уравнения	Значение коэффициента	Статистическая значимость	Бета коэффициент
Свободный член регрессионного уравнения	0,5591	p < 0,0001	–
Послеоперационная площадь поперечного сечения позвоночного канала менее 80 мм ²	0,2777	p < 0,0001	0,5783
Глубина латерального канала менее 3 мм,	0,1008	p = 0,0088	0,2671
Абсолютное значение площади позвоночного канала, мм ²	– 0,0005	p = 0,3351	– 0,1013
Глубина правого бокового канала, мм	0,0221	0,2670	0,1426
Глубина левого бокового канала, мм	– 0,0037	0,8763	0,0207

Клиническое наблюдение 1

Пациентка Б., 56 лет, госпитализирована в отделение онкологии и нейрохирургии 13.04.2021 с жалобами на интенсивные боли в области поясницы, иррадиирующие в область бедер и голеней, чувствительные нарушения в области стоп. Указанные жалобы у пациентки появлялись в вертикальном положении, симптоматика усиливалась при ходьбе, без остановки могла пройти только 200 метров. В положении лежа беспокоили боли в пояснице, иррадиация в нижние конечности отсутствовала. Проводились повторные курсы консервативной терапии – без значимого клинического эффекта. При поступлении – интенсивность боли в пояснице ВАШ 70 баллов, интенсивность болей нижних конечностей ВАШ 50 баллов, значение индекса ограничения жизнедеятельности Освестри 64,0%.

При неврологическом осмотре – клиника соответствовала синдрому нейрогенной перемежающейся хромоты. Сила конечностей составляла 5 баллов,

чувствительных нарушений не выявлено. Симптом Ласега с двух сторон положительный с 50°.

По данным функциональных рентгенограмм – признаки нестабильности сегмента L4-L5.

По результатам КТ – данные за дегенеративный спондилолистез L4 1 степени, дегенеративный стеноз позвоночного канала (центральный, и фораминальный) на уровне L4-L5 (Рисунок 5.1).

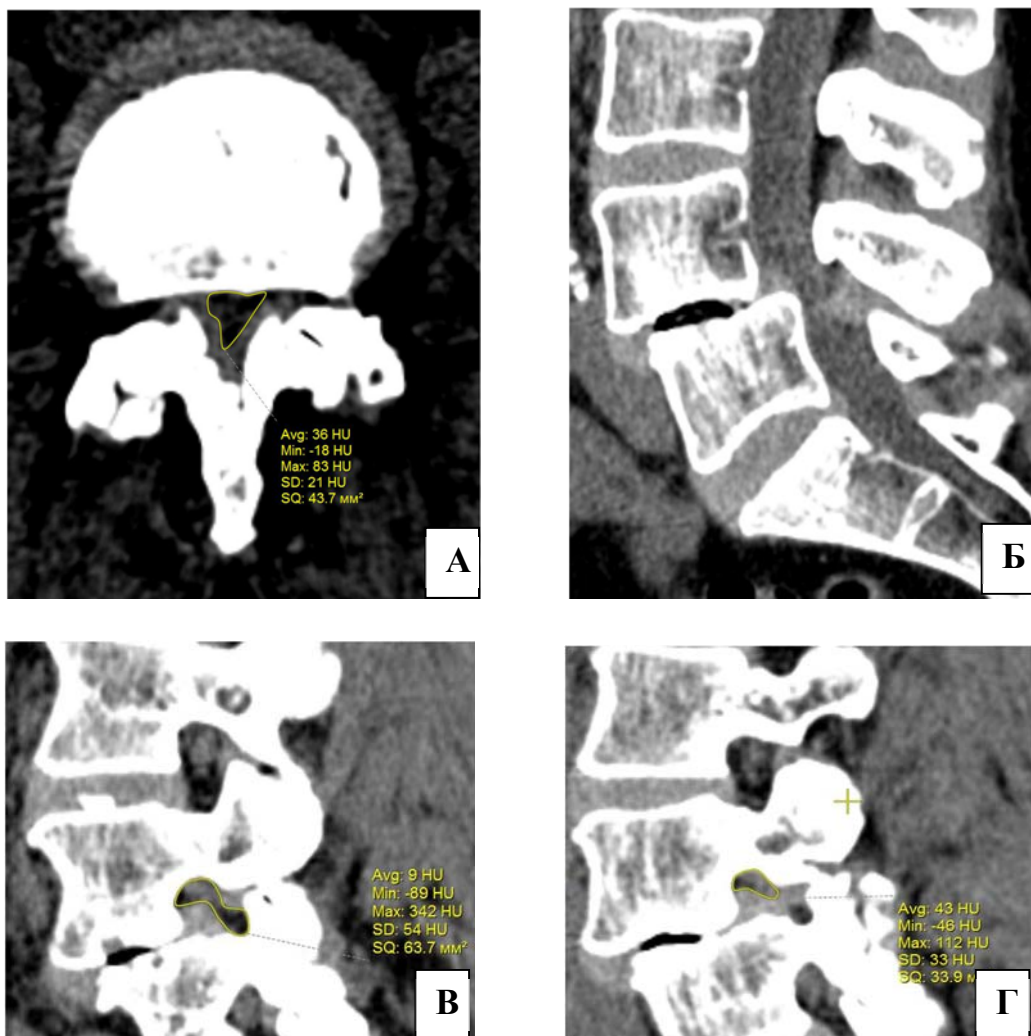


Рисунок 5.1 – Данные предоперационного КТ исследования: аксиальная КТ реконструкция до оперативного вмешательства (А), сагиттальная КТ реконструкция до оперативного вмешательства (Б), КТ срез через правую форамину (В), КТ срез через левую форамину (Г)

По данным КТ площадь позвоночного канала составила 43,7 мм², площадь межпозвонковых отверстий составила справа 63,7 мм², слева 33,9 мм². Тем не менее, клиника фораминального стеноза позвоночного канала не была выявлена.

Было принято решение о применении не прямой декомпрессии с применением межтелового спондилодеза ALIF и перкутанной транспедикулярной фиксации с выполнением редукции L4 позвонка.

После оперативного вмешательства – полный регресс клиники нейрогенной перемежающейся хромоты, боли в области поясницы непостоянные, по интенсивности не превышающие 15 баллов по шкале ВАШ. По результатам контрольных КТ произошло увеличение площади поперечного сечения позвоночного канала до 92,4 мм², а площади правой и левой форамини до 99,1 мм² и 125,1 мм² соответственно. Достигнута полная редукция L4 позвонка (Рисунок 5.2).

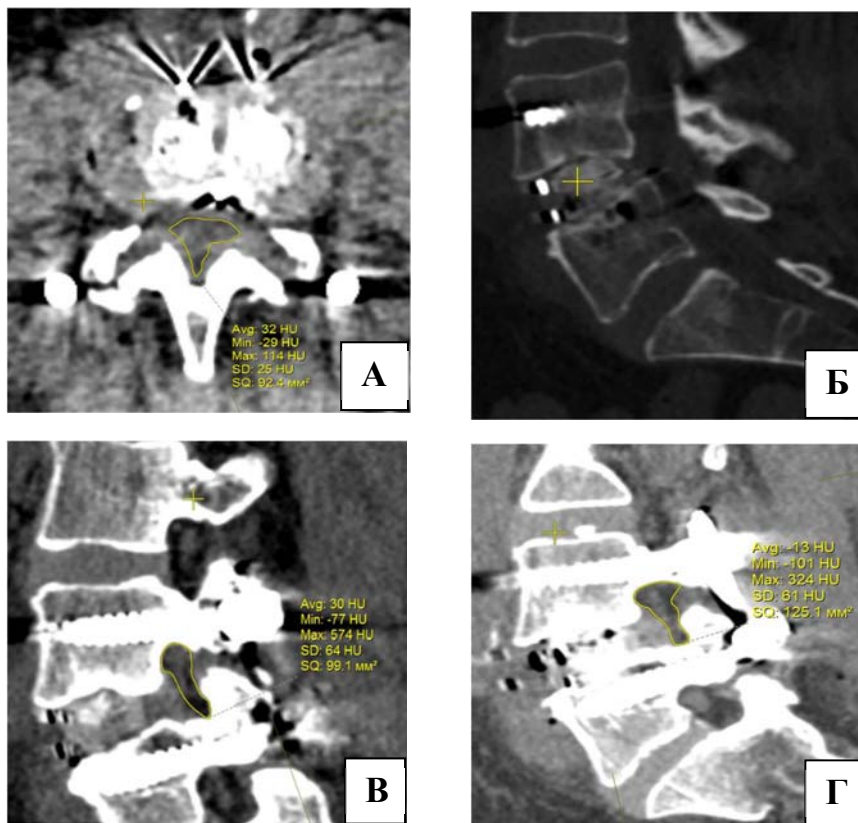


Рисунок 5.2 – Данные послеоперационного КТ исследования: аксиальная КТ реконструкция после оперативного вмешательства (А), сагиттальная КТ реконструкция после оперативного вмешательства (Б), КТ срез через правую форамину (В), КТ срез через левую форамину (Г)

Срок наблюдения составил 12 месяцев, достигнут стойкий регресс неврологической симптоматики.

5.4 Обсуждение результатов

Дегенеративный стеноз позвоночного канала на уровне поясничного отдела позвоночника является одним из наиболее распространенных дегенеративных заболеваний, частота которого составляет 11,0 – 38,0% [250]. Если данная патология сочетается с нестабильностью позвоночно-двигательного сегмента, то наиболее эффективным методом лечения является декомпрессия корешков, транспедикулярная фиксация и межтеловой спондилодез. В настоящее время возрастает популярность реконструктивных вмешательств с применением спондилодеза из вентрального доступа. Помимо того, что данные вмешательства позволяют эффективно восстановить сегментарный лордоз и позвоночно-тазовые соотношения, обеспечивают максимальную стабильность оперированного сегмента, при использовании данной техники декомпрессия корешков достигается за счет восстановления высоты межпозвонкового промежутка и редукции позвонка. Эффект последней достигается за счет натяжения волокон задней продольной связки, за счет чего уменьшается пролабирование диска в позвоночный канал, а также за счет уменьшения толщины желтой связки [97, 116, 245]. Наиболее изучены результаты не прямой декомпрессии у пациентов с фораминальным стенозом позвоночного канала. За счет восстановления высоты диска удается увеличить площадь форамины на 8,0 – 60,0%, в среднем – на 36,0%, а ее высоту – на 6,0 – 65,0%, в среднем – на 30,0% [245]. Противоречивыми остаются данные об эффективности не прямой декомпрессии при центральном стенозе позвоночного канала, поскольку изменение площади его поперечного сечения вариабельно, и по данным опубликованных исследований, может увеличиться в диапазоне от 7,0% до 143,0% от исходного размера [127, 159, 245, 309]. Полного соответствия степени увеличения поперечного канала и клинических результатов не отмечено, поскольку даже небольшое увеличение площади позвоночного канала в пределах 14,0% часто оказывалось достаточным для регресса неврологической симптоматики [283]. Это позволяет предположить, что все же наибольшее значение имеют целевые пороговые значения, которые необходимо превысить в результате не прямой декомпрессии. Остается недостаточно изученным вопрос об

ограничениях метода не прямой декомпрессии, поскольку нередко требуется дополнять ее прямой микрохирургической декомпрессией, частота таких наблюдений значительно варьирует, составляя 9,5 – 43,0%, в среднем составляет 9,9% [29, 85, 180, 225, 309]. Такой разброс данных свидетельствует о неоптимальном отборе пациентов для выполнения не прямой декомпрессии. В настоящее время известны рентгенологические критерии дегенеративного стеноза позвоночного канала, с другой стороны, отмечено, что данные нейровизуализации не полностью коррелируют с клиническими данными, и условием для постановки диагноза является соответствие неврологической симптоматики и данных инструментальных исследований [101]. Это значительно затрудняет принятие решения о необходимости микрохирургического вмешательства или возможности выполнения не прямой декомпрессии. Указанные выше особенности позволяют предположить, что рентгенологические критерии являются ненадежными, в связи с этим выполнена и опубликована работа, которая обосновывает достаточно простой клинический тест, позволяющий осуществить отбор пациентов для выполнения не прямой декомпрессии. Суть этого теста заключается в следующем: если в положении лежа (в котором исключен динамический компонент дегенеративного стеноза) регрессирует неврологическая симптоматика, то ожидается клинически значимый результат не прямой декомпрессии [114]. С другой стороны, это исследование представляет собой не вполне уместный редукционизм: не учитывает тот эффект, который может быть достигнут за счет восстановления высоты межпозвонкового промежутка и редукции позвонка при спондилолистезе. Учитывая недостатки ранее опубликованных исследований, была поставлена задача: оценить клинкорентгенологические корреляции, которые имели бы значение для прогнозирования результатов не прямой декомпрессии. Для выполнения этой задачи были определены пороговые значения параметров позвоночного канала, наиболее точно дискриминирующие наблюдения, когда неврологическая симптоматика регрессировала в положении лежа. В отношении прогностической значимости выявленных корреляций

предполагалось, что останутся неразрешенные вопросы: в положении лежа не происходит редукция позвонка и не восстанавливается высота межпозвонкового промежутка. С другой стороны, можно предположить иное значение вычисленных пороговых значений: они могут быть целевыми при выполнении не прямой декомпрессии.

В ходе выполнения исследования результате логистического регрессионного анализа с применением ROC-кривых получены следующие значения с наиболее эффективной дискриминацией наблюдений: наибольшей точностью классификации и специфичностью обладало пороговое значение $80,26 \text{ мм}^2$, в то время как максимальной чувствительностью обладало значение $134,28 \text{ мм}^2$. Полученные данные позволяют сделать вывод, что у пациентов с площадью позвоночного канала более 134 мм^2 не требуется микрохирургическая декомпрессия. Тем не менее, полученные данные нуждаются в дополнительной валидации: необходимо оценить, насколько эти пороговые значения соотносятся с клиническими результатами применения не прямой декомпрессии. Для того, чтобы прогнозировать рентгенологический результат не прямой декомпрессии был выполнен регрессионный анализ, для площади поперечного сечения позвоночного канала наилучшим образом подошла линейная регрессионная модель. В ходе анализа было выявлено, что послеоперационное значение площади позвоночного канала зависело от его изначальных размеров, но также значимый вклад вносили восстановление межпозвонкового промежутка в задних отделах и разница трансляции в сагиттальной плоскости до и после операции. Последний фактор по значимости значительно превысил первый, таким образом, наилучшими кандидатами для выполнения не прямой декомпрессии можно считать пациентов с нестабильным спондилолистезом. Обе модели для пациентов, которым выполнялась редукция позвонка и только восстановление межпозвонкового промежутка обладали хорошим качеством, что позволило сделать заключение, что рентгенологический результат не прямой декомпрессии при центральном стенозе позвоночного канала может быть спрогнозирован. Существенно труднее спрогнозировать

размеры бокового канала после выполнения не прямой декомпрессии. Полученные модели для глубины правого и левого бокового канала имели ошибку аппроксимации, не позволяющую применять эти модели в клинической практике. Это объясняет, почему латеральный стеноз позвоночного канала считается неблагоприятным фактором для выполнения не прямой декомпрессии. Для верификации клинической значимости выявленных значений были соотнесены клинические и рентгенологические результаты не прямой декомпрессии, с использованием ядерного дискриминантного анализа была построена апостериорная модель прогнозирования риска неудовлетворительных результатов. В модели были использованы дихотомизированные переменные, основанные на вычисленных пороговых значениях площади позвоночного канала $80,26 \text{ мм}^2$ и $134,28 \text{ мм}^2$, глубины латерального канала 3 мм, являющегося критерием латерального стеноза позвоночного канала. Также модель включала абсолютные значения площади позвоночного канала и глубины латерального канала. По результатам анализа выявлено, что неудовлетворительные результаты отмечались у пациентов, если площадь поперечного сечения позвоночного канала после не прямой декомпрессии была меньше 80 мм^2 и если даже с одной стороны глубина бокового канала была менее 3 мм, в то время как абсолютные значения этих параметров были статистически незначимыми в полученной модели. Данный фрагмент исследования верифицировал пороговые значения, которые можно считать целевыми для выполнения не прямой декомпрессии. При планировании операции с использованием полученных уравнений должна быть выполнена оценка, превысит ли площадь поперечного сечения канала 80 мм^2 . При латеральном стенозе позвоночного канала необходимо учитывать результаты клинического теста и то, что медиана для приращения глубины бокового канала менее 1 мм. Если принято решение о выполнении не прямой декомпрессии у пациентов с глубиной боковых каналов менее 3 мм, следует принимать во внимание необходимость дополнительной микрохирургической декомпрессии корешков спинного мозга.

ГЛАВА 6 ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЕРАТИВНОГО ЛЕЧЕНИЯ У ПАЦИЕНТОВ С ПОСТТРАВМАТИЧЕСКИМ СТЕНОЗОМ ПОЗВОНОЧНОГО КАНАЛА НА УРОВНЕ ПОЯСНИЧНОГО ОТДЕЛА И ГРУДОПОЯСНИЧНОГО ПЕРЕХОДА

6.1 Характеристика и особенности исследования

С целью оценки факторов, влияющих на стабильность фиксатора у пациентов с травматическими повреждениями поясничной области и области грудопоясничного перехода выполнен амбиспективный анализ результатов оперативного лечения 204 пациентов (117 мужчин, 87 женщин; средний возраст 40 лет, $\sigma = 15,01$; 18 – 71 год) с травматическими повреждениями на уровне поясничного отдела позвоночника и грудопоясничного перехода с уровня Th10 до L5 включительно. Анализ проводился на основании результатов рентгенологических методов исследования. Минимальный срок послеоперационного наблюдения составил 18 месяцев.

Критерии включения пациентов в исследование: нестабильные и условно стабильные повреждения позвоночника в области поясничного отдела или грудопоясничного перехода, тип С, В1, В2, А4, А3, включены пациенты групп С, D, E по шкале ASIA. Из исследования были исключены пациенты с множественными и многоуровневыми повреждениями, пациенты с низкоэнергетическими переломами, обусловленными новообразованием, пациенты с повторными оперативными вмешательствами, пациенты, которым выполнялась аугментация костной ткани для увеличения стабильности винтов, пациенты с усталостными переломами компонентов транспедикулярного фиксатора, а также все наблюдения с нарушением технологии установки транспедикулярных винтов и их повторным проведением в ходе операции. Стандартное предоперационное обследование включало неврологический осмотр с оценкой тяжести повреждения спинного мозга по шкале ASIA и КТ поясничного

отдела позвоночника, включающее в том числе оценку радиоденсивности губчатой костной ткани позвонков по стандартной методике (протокол КТ исследования и методику оценки радиоденсивности костной ткани – см. глава 2 «Материалы и методы»). В зависимости от локализации компримирующего субстрата всем пациентам с неврологическими нарушениями (группы ASIA C, D) выполнялась микрохирургическая декомпрессия корешков и спинного мозга из дорзального, вентрального или комбинированного доступа. Объем резекции костных структур и связок задней опорной колонны в ходе декомпрессии нами классифицирован следующим образом: двухсторонняя тотальная фасетэктомия с полным удалением межостистой и желтой связок осуществлена 48 (23,5%) пациентам, 66 (32,4%) пациентам выполнялась ламинэктомия. Тотальная резекция структур задней опорной колонны, сочетающая ламинэктомию и тотальную резекцию дугоотростчатых суставов выполнена 37 пациентам (18,1%). Реконструкция передней колонны выполнена 76 пациентам (37,2%), из них 31 (15,1%) пациенту выполнена передняя декомпрессия спинного мозга и корешков, в ходе которой были удалены отломки позвонка, смещенные в позвоночный канал. Всем пациентам была выполнена открытая транспедикулярная фиксация поврежденных сегментов, при этом, промежуточная фиксация (транспедикулярная фиксация с установкой винтов в сломанный позвонок) выполнена 93 (45,6%) пациентам. Короткая моносегментарная фиксация выполнена 10 пациентам (4,9%), бисегментарная фиксация – 139 пациентам (68,1%), 21 пациенту (10,3%) выполнено вмешательство на 3 сегментах, у 34 пациентов фиксация включала 4 сегмента (16,7%). Люмбосакральная фиксация выполнена 6 пациентам (2,9%). Помимо вышеперечисленных, при выполнении анализа учитывался биомеханический фактор, обусловленный неполной коррекцией деформации. У 38 пациентов (18,6%) сохранялась остаточная деформация более 10 градусов.

Послеоперационное наблюдение проводилось в сроки 3, 6, 12 и 18 месяцев. Пациентам проводился неврологический осмотр, оценка интенсивности болевого синдрома по шкале ВАШ. Через 3 месяца после операции выполнялась обзорная рентгенография поясничного отдела позвоночника в вертикальном положении.

При подозрении на раннюю нестабильность имплантатов выполнялась КТ. Через 6 и 12 месяцев после операции выполнялась плановая КТ, а через 18 месяцев КТ выполнялась в случае отсутствия признаков формирования костного блока в срок 12 месяцев. По результатам КТ оценивалась стабильность фиксатора и формирование переднего и заднего костного блока. Рентгенологическими признаками нарушения стабильности фиксатора по данным КТ являлись формирование рентгенпрозрачной зоны вокруг резьбовой части транспедикулярного винта шириной более 1 мм, или формирование признака double halo sign – двойного контура, когда область резорбции костной ткани вокруг винта окружена остеосклерозом [231]. Степень формирования переднего костного блока оценивалась по G.H. Tap (2007), причем степень формирования костного блока 1 и 2 были объединены по причине отсутствия клинических различий у этих пациентов [1, 100]. В итоге, костный блок был классифицирован как биполярное сращение, униполярный и биполярный псевдоартроз. Степень формирования заднего костного блока оценивалась по В. Ф. Christensen (2001), он классифицировался как полный костный блок, частичный костный блок и отсутствие костного блока [167].

Статистический анализ

При оценке факторов, влияющих на частоту дестабилизации транспедикулярного инструментария учитывались следующие предикторы: радиоденсивность костной ткани в НУ, протяженность фиксации, применение промежуточной фиксации (установка винтов в сломанный позвонок), наличие остаточной кифотической деформации более 10°, люмбосакральная фиксация, реконструкция передней опорной колонны, и объем резекции костных структур и связок: передняя декомпрессия невральных структур и резекция структур задней опорной колонны (ляминэктомия и фасетэктомия). Для определения значимости связи предполагаемых предикторов и частоты рентгенологических признаков нестабильности транспедикулярного инструментария применялся логистический регрессионный анализ, или ядерный дискриминантный анализ. В итоге,

выбиралась модель с наилучшей эффективностью классификации наблюдений. Для оценки значимости отличий частоты осложнения применялся точный тест Фишера. Оценка значимости факторов проведена дважды – для частоты всех случаев с признаками расшатывания винтов по данным КТ и для частоты клинически значимой дестабилизации имплантатов.

6.2 Результаты исследования факторов, влияющих на стабильность фиксации у пациентов с посттравматическим стенозом позвоночного канала на уровне поясничного отдела и грудопоясничного перехода

В группе пациентов, включенных в исследования у 63 (30,9%) отмечено снижение значений радиоденсивности ниже порогового значения 110 HU которое обладает 90,0% специфичностью выявления остеопороза [336]. Вероятно, что эта особенность группы пациентов являлась причиной относительно большой частоты выявления расшатывания винтов по данным КТ. За время наблюдения у 52 (25,5%) пациентов были выявлены рентгенографические признаки расшатывания винтов. При этом, лишь у 27 (13,2%) пациентов нестабильность фиксатора была клинически значимой, что потребовало выполнения ревизионного вмешательства. У этих пациентов отмечалось прогрессирование аксиального болевого синдрома, результаты исследования интенсивности боли превышали 40 баллов по ВАШ, индекс ограничения жизнедеятельности Освестри превышал 40,0%. При клинически значимой нестабильности отсутствовали признаки биполярного сращения после переднего спондилодеза или, как минимум, частичного заднего костного блока на уровне оперированных сегментов. В остальных случаях, несмотря на КТ данные, нарастания интенсивности аксиального болевого синдрома выявлено не было, и был верифицирован полный передний или частичный задний костный блок на уровне оперированных сегментов.

При выполнении регрессионного анализа (общая логистическая регрессионная модель) выявлено, что при снижении радиоденсивности костной ткани в HU отмечалось увеличение частоты дестабилизации транспедикулярного инструментария, но хирургическая тактика тоже в значительной степени влияла на

частоту развития осложнения. Если выполнялась реконструкция передней опорной колонны, то частота дестабилизации транспедикулярного фиксатора снижалась. Промежуточная фиксация также значительно уменьшала частоту осложнения. Факторами риска дестабилизации транспедикулярного инструментария были: остаточная кифотическая деформация более 10° и люмбосакральная фиксация. При увеличении протяженности фиксации происходило увеличение частоты расшатывания транспедикулярных винтов по данным КТ. Экстенсивная декомпрессия, включающая одновременно ламинэктомию и, как минимум на одном уровне тотальную фасетэктомию статистически значимо увеличивала частоту дестабилизации фиксатора по данным КТ. В таблице 6.1 представлены параметры логистической регрессионной модели (регрессионный коэффициент, его статистическая значимость и отношение шансов на единицу изменения предиктора).

Таблица 6.1 – Параметры общей логистической регрессионной модели

Компонент уравнения регрессионного	Коэффициент и его статистическая значимость	Отношение шансов и его 95% доверительный интервал
Свободный член	-1,5227, p=0,0537	
Количество сегментов	0,6215, p=0,0076	1,8617 [1,1819; 2,9324]
Люмбосакральная фиксация	2,3039, p=0,0292	10,0136 [1,2655; 79,2374]
Остаточная деформация более 10°	1,3772, p=0,0028	3,9636 [1,6161; 9,7213]
Промежуточная фиксация	0,8377, p=0,0457	2,3110 [1,0162; 5,2553]
Реконструкция передней колонны	-1,2827, p=0,0095	3,7491 [1,3725; 3,6062]
Радиоденсивность, НУ	-0,0142, p=0,0029	0,9869 [0,9768; 0,9951]
Ляминэктомия	0,8809, p=0,0448	2,4130 [1,0210; 5,7029]
Передняя декомпрессия	-0,0726, p=0,9071	0,9299 [0,2729; 3,1688]

Общая пригодность регрессионной модели $\chi^2 = 49,8090$; $p < 0,0001$. Модель правильно классифицирует 79,9% наблюдений, чувствительность составила 42,3%, специфичность – 92,7%. При исключении факторов с незначимыми регрессионными коэффициентами полученная модель не отличалась статистически значимо от исходной, $p=0,3639$ (метод максимального правдоподобия).

При оценке влияния этих предикторов на частоту клинически значимого расшатывания винтов наилучшими операционными свойствами обладала ретроспективная модель с применением ядерного дискриминантного анализа.

Квадрат Махаланобиса между центроидами групп с клинически значимой дестабилизацией имплантатов и без нее составил 5,1307; $F = 8,6966$, $p < 0,0001$. Получен значимый канонический корень дискриминантной функции: общее значение 0,5950, $r = 0,6108$, λ Уилкса = 0,6169, $\chi^2 = 91,277$; $p < 0,0001$. Параметры дискриминантной регрессионной модели представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Параметры регрессионной дискриминантной модели для наблюдений с клинически значимой дестабилизацией транспедикулярной фиксации у пациентов с травматическими повреждениями поясничного отдела позвоночника и грудопоясничного перехода

Компонент уравнения	регрессионного	Значение коэффициента	Статистическая значимость	Бета коэффициент
Свободный член	регрессионного уравнения	0,5679	$p=0,0008$	-
Остаточная деформация более 10°		0,0529	$p=0,0518$	0,1216
Сформированный передний костный блок		0,0027	$p=0,9323$	0,0063
Сформированный частичный или полный задний костный блок на всех уровнях в пределах фиксации		-0,1684	$p=0,0006$	-0,4612
Передняя декомпрессия		0,0219	0,5109	0,0463
Реконструкция передней колонны		-0,0780	0,0040	0,0207
Экстенсивная декомпрессия с выполнением ламинэктомии и двухсторонней фасетэктомии		0,1194	$p=0,0003$	0,2716
Люмбосакральная фиксация		0,0799	0,2133	0,0796
Локализация (грудопоясничный переход или нижний поясничный отдел)		-0,0140	0,5590	-0,0362
Радиоденсивность, NU		0,0002	0,6894	0,0239
Протяженность фиксации, количество уровней		0,0362	0,6894	0,0239
Применение промежуточной фиксации		-0,1262	0,0025	-0,2036

Специфичность модели составила 93,8%, чувствительность – 63,0%, точность – 89,7%.

Из данных анализа следует, что на частоту клинически значимой дестабилизации транспедикулярных винтов влияют три фактора: промежуточная

фиксация и реконструкция передней колонны снижали частоту осложнения, в то время как декомпрессия с выполнением двухсторонней фасетэктомии и ламинэктомии увеличивала частоту клинически значимой дестабилизации фиксатора. Частичный или полный задний костный блок, сформированный на уровне оперированных сегментов, существенно снижал частоту возникновению осложнений в то время, как биполярное формирование переднего костного блока не оказало статистически значимого эффекта. Такие факторы, как остаточная деформация, локализация перелома (нижняя поясница или грудопоясничный переход), люмбосакральная фиксация и протяженность фиксации не оказали существенного влияния на частоту клинически значимой дестабилизации. Примечательно, что влияние хирургической тактики существенно превысило влияние характеристик костной ткани: радиоденсивность в НУ оказалась незначимым фактором.

6.3 Обсуждение результатов

Транспедикулярная фиксация широко применяется для лечения нестабильных повреждений позвоночника поясничного отдела и грудопоясничного перехода, при этом наиболее частым осложнением данных вмешательств является дестабилизация транспедикулярного инструментария, особенно у пациентов с нарушением плотности костной ткани [165, 246, 336]. Несмотря на данные исследований, говорящие о том, что рентгенпрозрачная зона вокруг винтов 1 мм или наличие двойного контура ассоциируется со значительным уменьшением прочности фиксации винта в костной ткани, не все случаи с КТ признаками расшатывания винтов требуют ревизии по причине асимптоматичности [231]. По этой причине проведена оценка предполагаемых факторов риска как для всех наблюдений с признаками дестабилизации транспедикулярных винтов по КТ, так и для частоты клинически значимой дестабилизации фиксатора.

Компьютерная томография применяется в подавляющем большинстве случаев травматических повреждений позвоночника для получения детальных

характеристик повреждения, в том числе КТ позволяет оценить также и свойства костной ткани, и риски оперативных вмешательств с применением транспедикулярной фиксации и межтелового спондилодеза [46, 336]. С другой стороны, как и при дегенеративной патологии позвоночника, построение модели для оценки риска имплантатзависимых осложнений представляется необоснованно упрощенной, поскольку хирургическая тактика оказывает существенное влияние на результаты оперативного лечения нестабильной травмы позвоночника.

В настоящее время доказано, что реконструкция передней колонны значительно увеличивает стабильность на уровне сегментов, оперированных с применением транспедикулярной фиксации, снижая нагрузку на винты [23, 183, 278]. С другой стороны, передний спондилодез требует выполнения вмешательства из вентрального доступа, который, по мнению некоторых авторов, существенно увеличивает травматичность операции и кровопотерю [175]. В случае, когда необходимо снизить травматизм операции по причине состояния пациента, необходимы альтернативные способы увеличения стабильности фиксации и в настоящее время все чаще применяется промежуточная фиксация, когда вводятся винты моностерально или билатерально в сломанный позвонок [50, 58, 175, 183, 222]. И реконструкция передней колонны, и промежуточная фиксация существенно снижают нагрузку на крайние точки фиксации транспедикулярной системы, уменьшая частоту расшатывания винтов и усталостных переломов, что позволяет считать последнюю альтернативой передней реконструкции, если не требуется передняя декомпрессия или невозможно выполнить реконструкцию передней колонны по состоянию больного [175]. Кроме того, при выполнении одновременно промежуточной фиксации и передней реконструкции возможен суммационный эффект, увеличивающий прочность фиксации [12]. По результатам нашего исследования и реконструкция передней колонны, и промежуточная фиксация оказывали сопоставимый эффект как в отношении частоты выявления расшатывания винтов по результатам КТ, так и для частоты клинически значимой дестабилизации фиксатора.

До настоящего времени не полностью разрешены противоречия в отношении протяженности фиксации, необходимой для стабилизации переломов переходной грудопоясничной области. Длительное время считалось, что транспедикулярная фиксация при травматических повреждениях этой области должна включать, как минимум, 4 сегмента, особенно у пациентов с нарушением плотности костной ткани [185]. С другой стороны, в настоящее время также опубликовано много работ с успешным применением короткой фиксации, особенно если выполнялась промежуточная фиксация [51, 94, 183, 200, 228, 242]. Объяснением наблюдаемым противоречиям может быть следующее: длинная фиксация необходима для коррекции посттравматической деформации и предпочтительна для переломов типа С по АО классификации [129, 175]. При увеличении протяженности фиксации возможно увеличение нагрузки на винты крайних точек за счет увеличения плеча рычага. Этот же эффект наблюдается у пациентов с дегенеративной патологией позвоночника [231, 234]. Кроме того, при выполнении четырехсегментарной фиксации реконструкция передней колонны выполняется на уровне центральных двух сегментов, что может объяснять расшатывание винтов крайних точек. Расшатывание винтов в крайних точках у большинства таких пациентов было асимптоматичным поэтому не влияло на частоту ревизионных вмешательств по поводу нестабильности транспедикулярного фиксатора.

Наименее изученным фактором, влияющим на результаты оперативных вмешательств по поводу нестабильной травмы позвоночника, является объем резекции опорно-связочного аппарата при декомпрессии спинного мозга и корешков. До настоящего времени нет убедительных данных, какой вид декомпрессии предпочтителен у пациентов с осложненной травмой позвоночника на уровне поясничного отдела и переходной грудопоясничной области. По данным большинства опубликованных исследований, не выявлено клинически значимых отличий между теми пациентами, которым выполнялась только задняя декомпрессия только передняя или вмешательство из комбинированного доступа: частота регресса неврологической симптоматики в этих группах не отличалась [39, 40, 316, 317, 319]. С другой стороны, результаты выполненного исследования

демонстрируют, что выбор метода декомпрессии невральных структур может иметь значение именно у пациентов с нарушением плотности костной ткани. По результатам регрессионного анализа, ламинэктомия в сочетании с тотальной резекцией дугоотростчатых суставов увеличивает риск клинически значимой дестабилизации транспедикулярного фиксатора в то время, как резекция задней трети тела позвонка, необходимая для передней декомпрессии, не влияет ни на частоту расшатывания винтов по данным КТ, ни на частоту клинически значимой дестабилизации фиксатора. Наблюдаемый эффект может иметь несколько объяснений. Принимая во внимание механизм расшатывания винтов и отсутствие дополнительной стабильности, которую обеспечивает задний опорный комплекс, резекция структур задней опорной колонны может увеличить нагрузку на фиксатор, способствуя возрастанию частоты его дестабилизации [66, 205]. Также по причине того, что плотность костной ткани задних структур может значительно превышать плотность костной ткани тела позвонка, формирование заднего костного блока может происходить быстрее, снижая риски имплантатзависимых осложнений [35, 336]. Принимая во внимание результаты анализа, у пациентов с нарушением плотности костной ткани следует сохранить задние структуры позвонков для формирования заднего резервного костного блока: даже частично сформированный задний костный блок на всех уровнях в пределах фиксации снижает частоту расшатывания имплантатов.

Среди дополнительных факторов, которые могут повлиять на стабильность транспедикулярного фиксатора следует отметить люмбосакральную фиксацию, и остаточную деформацию оперированных сегментов, превышающую 10° . Увеличение частоты расшатывания винтов при люмбосакральной фиксации обусловлено анатомическими и биомеханическими особенностями сегмента. Остаточная кифотическая деформация более 10° , по результатам ранее опубликованных работ, также являлась значимым фактором, увеличивающим частоту неудовлетворительных результатов оперативных вмешательств по поводу травм позвоночника [37]. По результатам исследования, оба указанных фактора риска приводили к увеличению расшатывания винтов по результатам КТ, не

оказывая влияния на частоту клинически значимых случаев, в итоге, уступая по значимости другим факторам риска.

Таким образом, результаты исследования позволяют сделать вывод, что у пациентов с травматическими повреждениями позвоночника результаты оперативного лечения зависят от хирургической тактики, которая может иметь не меньшее значение, чем свойства костной ткани. Ситуация часто усугубляется тем, что тяжесть состояния больного вследствие сопутствующих заболеваний или тяжести травмы может не позволить выполнить полный объем оперативного вмешательства. Риск дестабилизации имплантатов можно существенно снизить, перераспределяя нагрузку на винты за счет промежуточной фиксации и реконструкции передней колонны. Эффект этих методик сопоставим, следовательно, при невозможности выполнить реконструкцию передней колонны промежуточная фиксация может обеспечить удовлетворительный биомеханический эффект. Сохраненные задние структуры могут обеспечить формирование резервного заднего костного блока у больных с нарушением качества костной ткани, которое затрудняет формирование переднего спондилодеза, следовательно, при повышенном риске дестабилизации фиксатора декомпрессия из переднего доступа предпочтительна. Если требуется выполнение задней декомпрессии целесообразно, по возможности, избегать экстенсивной декомпрессии с ламинэктомией и двухсторонним тотальным удалением дугоотростчатых суставов.

ГЛАВА 7 РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНИК АУГМЕНТАЦИИ КОСТНОЙ ТКАНИ ТЕЛ ПОЗВОНКОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ТРАНСПЕДИКУЛЯРНОЙ ФИКСАЦИИ

7.1 Характеристика и особенности исследования

Результаты применения технологии аугментации костной ткани исследованы в ходе продольного проспективного нерандомизированного исследования, в которое включены 152 пациента (65 мужчин, 87 женщин; средний возраст 65,2 года; $\sigma = 7,5271$; от 48 до 82 лет, количество пациентов указано с учетом потери наблюдений во время выполнения исследования). При предоперационном обследовании у пациентов выявлены признаки остеопороза позвоночника, критерием диагноза были или снижение Т-критерия ниже $-2,5$; или радиоденсивность губчатой костной ткани позвонка менее 110 HU.

В исследование включены:

- пациенты как с травматическими повреждениями поясничного отдела позвоночника и грудопоясничного перехода типа А3, А4, В2, С на фоне остеопороза, группы С, D, E ASIA;
- пациенты с дегенеративным стенозом позвоночника на фоне нестабильности сегмента, при интенсивности болевого синдрома более 40 баллов по ВАШ (шкала 0 – 100 баллов) и значении индекса ограничения жизнедеятельности Освестри 40,0%. Критерием нестабильности сегмента были трансляция в сагиттальной плоскости более 3 мм, ротация более 10° .

Критериями исключения были:

- спондилолистез 3, 4 степени;
- дегенеративная деформация, с нарушением сагиттального баланса ($SVA > 5$ см, $PI-LL > 10$), требующие применения позвоночно-тазовой фиксации или протяженной фиксации более 5 сегментов;
- признаки нарушения техники оперативных вмешательств;

- конкурирующая патология: новообразования и воспалительные заболевания позвоночника;
- для ограничения количества факторов, которые могут повлиять на результаты, исключены пациенты, которым применялся спондилодез DLIF или ALIF по поводу дегенеративной патологии;
- исключены пациенты, которым была выполнена экстенсивная декомпрессия с удалением дуги и двухсторонним удалением дугоотростчатых суставов.

Предоперационное обследование пациентов включало неврологический осмотр и оценку интенсивности боли ВАШ, у пациентов с дегенеративной патологией позвоночника – оценку индекса ограничения жизнедеятельности Освестри. Перед операцией всем пациентам была выполнена КТ поясничного отдела позвоночника по стандартному протоколу, во время исследования всем пациентами определялась радиоденсивность на стандартном уровне L2 или L3. У пациентов с травматической патологией измерение проводилось на неповрежденном позвонке. Если планировалась аугментация костной ткани позвонка метилметакрилатом, оценивалась морфология венобазиллярной системы. С этой целью оценивали морфологию передней стенки позвоночного канала, а именно диаметр и расположение питающих отверстий, которые являются местом выхода из тела позвонка сосудов венобазиллярной системы. При наличии центрального питающего отверстия, диаметр которого не менее, чем в два раза больше, чем у других, оценивали как магистральный тип строения венобазиллярной системы. Несколько отверстий с незначительно отличающимся диаметром свидетельствуют о дисперсном строении венозных коллекторов. Для оценки риска дренирования цемента измерялся диаметр питающего отверстия. В случае, когда имелся дисперсный тип венобазиллярной системы, определялся наибольший диаметр питающего отверстия.

Пациенты, включенные в исследование разделены на 3 группы.

- Группа 1 – пациенты, которым применялась транспедикулярная фиксация с аугментацией костной ткани цементом на основе

полиметилметакрилата. Оперативное вмешательство выполнено 46 пациентам, из которых 16 – мужчины, 30 – женщины. Средний возраст пациентов в группе составил 61 год, $\sigma = 11,17$; минимум 31, максимум 79. У 38 пациентов (82,6%) прослежены результаты в течение 18 месяцев. Из 38 пациентов 6 наблюдений были с дегенеративной патологией (15,7%).

- Группа 2 – пациенты, которым выполнена транспедикулярная фиксация с применением разработанной технологии аугментации тел позвонков ауто- или аллокостью. Оперативное вмешательство выполнено 25 пациентам, из них: 6 – мужчины, 19 – женщины. Средний возраст составил 63 года, $\sigma = 9,52$; минимум – 39, максимум – 78 лет. В течение 18 месяцев прослежены результаты у 21 пациента (84,0%), из них пациенты с дегенеративной патологией составили 5 наблюдений (23,8%).

- Группа 3 – пациенты, которым выполнена транспедикулярная фиксация без аугментации костной ткани. Группа включала 118 пациентов, из них мужчины – 38 (32,2%), женщины – 80 (67,8%), средний возраст 58 лет, $\sigma = 10,8432$; минимум – 42 года, максимум – 81 год. Из них в течение 18 месяцев прослежены результаты у 93 пациентов (78,8%), пациенты с дегенеративной патологией составили 23 наблюдения (24,7%).

Группы сопоставимы по пропорции дегенеративной и травматической патологии, отличий между группами 1 и 3, 2 и 3 не выявлено, $p = 0,6292$ и $p = 0,99$ соответственно (применялся двухсторонний точный тест Фишера). Тем не менее, наличие в группах сравнения пациентов с разной патологией (дегенеративной и травматической) учтено при анализе.

Пациентам с травматическими повреждениями позвоночника выполнена транспедикулярная фиксация с применением промежуточной фиксации, при снижении высоты тела позвонка более, чем на 50,0% выполнялся передний межтеловой спондилодез, при наличии неврологической симптоматики выполнялась декомпрессия из вентрального или дорзального доступа, при вентральной локализации субстрата выполнялась передняя декомпрессия с применением реконструкции передней колонны. Пациентам с дегенеративным

стенозом позвоночного канала во всех случаях применялись микрохирургическая декомпрессия корешков и трансфораминальный межтеловой спондилодез.

В 20 наблюдениях аугментация позвонков выполнялась с применением вертебропластической техники. В этом случае после идентификации ножек позвонков транспедикулярно в тела позвонка вводились иглы для вертебропластики, проводились до середины тела позвонка в сагиттальной проекции. После этого в тела позвонков на каждом уровне с каждой стороны вводилось по 2 мл костного цемента на основе полиметилметакрилата. 20 пациентам инъекция жидкого полиметилметакрилата проводилось через канюлированные винты объемом по 2 мл на точку фиксации.

Результаты применения аугментации костной ткани оценивались непосредственно после выполнения операции. В раннем послеоперационном периоде выполнялась контрольная КТ. Кроме контроля положения имплантатов, полноты декомпрессии, адекватности выполнения аугментации оценивалось наличие таких осложнений, как дренирование цемента в позвоночный канал (миграция материала в случае аугментацией костью). При оценке дренирования в позвоночный канал учитывались только случаи с экстенсивным дренированием цемента, поскольку только в этих случаях существует риск неврологических нарушений. Если выполнялась аугментация костной ткани цементом, в послеоперационном периоде, пациентам выполнялась рентгенография грудной клетки для диагностики цементной легочной эмболии. В раннем послеоперационном периоде результаты прослежены у 40 пациентов после аугментации полиметилметакрилатом и у 25 пациентов с аугментацией костной крошкой.

В послеоперационном периоде наблюдение проводилось в срок 3, 6, 12 месяцев. Результаты в 3, 6 и 12 месяцев прослежены у 38 пациентов, у которых применялась аугментация костной ткани полиметилметакрилатом (80,0%), у 21 пациента после применения аугментации костной ткани аллокостью (84,0%) и у 93 пациентов (78,8%) контрольной группы. При контрольных осмотрах пациентам проводилось обследование с применением визуально-аналоговой шкалы и индекса

ограничения жизнедеятельности Освестри. Кроме того, в срок 3 месяца выполнялась контрольная спондилография, в срок 6 и 12 месяца – КТ позвоночника. Регистрировались наблюдения с признаками нестабильности имплантатов. Критериями нестабильности были разобщение или поломка компонентов фиксатора, резорбция костной ткани вокруг винта более 1 мм или признак двойного контура – Double halo sign.

7.2 Результаты применения аугментации на основе полиметилметакрилата

В раннем послеоперационном периоде по данным контрольных КТ в 4 наблюдениях выявлена легочная эмболия, что составило 8,7% с 95,0% CI [2,4 – 20,8%] (Рисунок 7.1А). У 3 пациентов данное осложнение было асимптоматичным, у 1 пациента сопровождалось стойкой торакалгией, требующей длительного применения анальгетиков. У 12 пациентов, которым выполнялась аугментация полиметилметакрилатом выявлено экстенсивное дренирование в позвоночный канал, что составляет 15,2% с 95,0% CI [4,9 – 26,3%] (Рисунок 7.1Б), из них только у 1 пациента дренирование было клинически значимым и потребовало выполнения декомпрессии с удалением цемента.

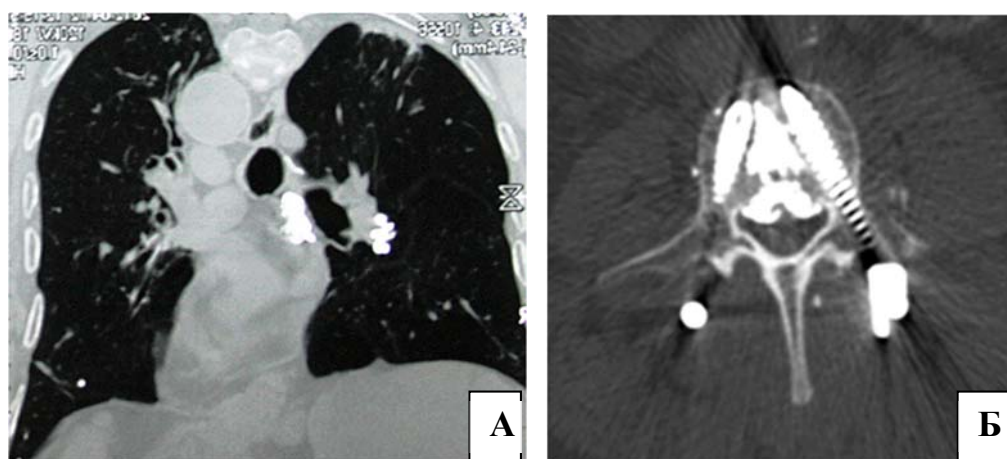


Рисунок 7.1 – Осложнения применения аугментации на основе ПММА: результаты послеоперационной КТ грудной клетки, признаки цементной легочной эмболии (А), признаки экстенсивного дренирования цемента после транспедикулярной фиксации с аугментацией тел позвонков ПММА (Б)

Проведена оценка факторов риска дренирования цемента в позвоночный канал, для этого использовались данные КТ 23 пациентов, которым выполнялась

аугментация одним типом цемента – Vertecem V+. Риск дренирования оценивался для каждого позвонка, в итоге оценка факторов риска выполнена на основании оценки морфологии 51 позвонка. По данным КТ 32 (62,7%) позвонка имели рассыпной тип строения венобазиллярной системы, 19 (37,3%) – магистральный. В итоге, при аугментации полиметилметакрилатом 9 из 51 позвонков (17,6%) выявлено экстенсивное дренирование в позвоночный канал. Для оценки факторов, влияющих на частоту дренирования цемента, выполнен логистический регрессионный анализ, и выявлено, что на частоту развития осложнений значимо влияют: тип строения венобазиллярной системы и максимальный диаметр питающего отверстия.

При оценке связи частоты осложнения и максимального диаметра питающего отверстия получена статистически значимая модель, $\chi^2 = 11,8950$, $p = 0,0060$. Параметры расчетной модели: $B_0 = -5,5109$ $p = 0,0160$; $B_1 = 1,1538$, $p = 0,0075$, отношение шансов на единицу изменения предиктора 3,1703, 95,0% CI [1,3799; 7,2838]. Таким образом, частота дренирования цемента в позвоночный канал имеет прямую зависимость с максимальным диаметром питающего отверстия. Следует отметить, что при размере питающих отверстий менее 3 мм не отмечено случаев дренирования в позвоночный канал. Также частота дренирования в позвоночный канал зависит от типа строения венобазиллярной системы, при ее магистральном типе частота дренирования возрастает. При проведении логистического регрессионного анализа получена статистически значимая модель, $\chi^2 = 7,5611$ $p = 0,0059$. Параметры расчетной модели: $B_0 = 0,5390$ $p = 0,2626$; $B_1 = 2,1691$, $p = 0,0163$, отношение шансов на единицу изменения предиктора 8,75, 95,0% CI [1,5183; 50,4259]. Таким образом, при планировании операции необходимо оценить морфологию венобазиллярной системы для выявления факторов риска дренирования цемента.

За время наблюдения в течение 18 месяцев у 10 из 38 пациентов (26,3%) отмечены признаки нестабильности фиксатора, из них у 3 пациентов выявлен перелом фиксатора, а у 7 – расшатывание винтов. Из 10 пациентов с признаками нестабильности фиксатора 7 потребовалось ревизионное оперативное

вмешательство с заменой фиксатора, что составило 18,4 % наблюдений. При осмотре у данных больных выявлен прогрессирующий аксиальный болевой синдром с интенсивностью боли по ВАШ более 40 баллов и индексом ограничения жизнедеятельности Освестри более 40,0%. У этих пациентов отсутствовали признаки формирования заднего и переднего костного блока. У пациентов с расшатыванием транспедикулярного фиксатора отмечены особенности локализации резорбции костной ткани. Рентгенпрозрачная зона вокруг винтов была конической, максимально выраженная в ножках позвонков (Рисунок 7.2). В итоге частота дестабилизации имплантатов составила 26,3%; 95,0% CI [13,4 – 43,1%] с частотой клинически значимой нестабильности 18,4%; 95,0% CI [7,7 – 34,3%].

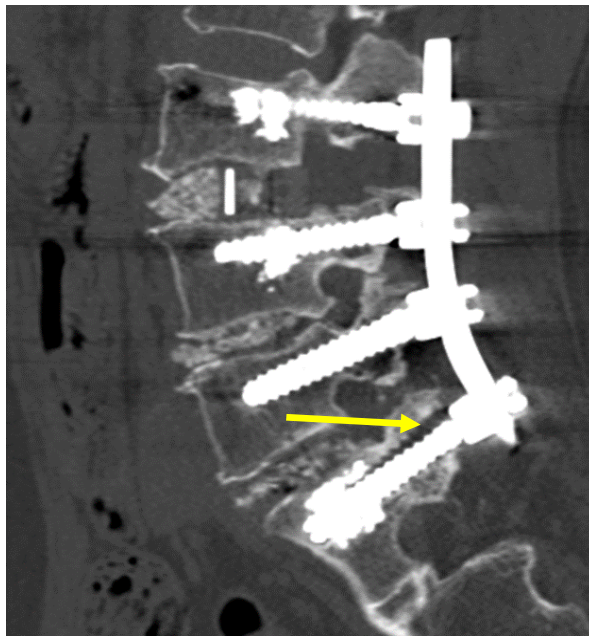


Рисунок 7.2 – Проксимальное расшатывание – резорбция костной ткани в области ножки позвонка (обозначено стрелкой)

7.3 Результаты транспедикулярной фиксации с аугментацией тела позвонка костной крошкой и сравнение с методикой аугментации полиметилметакрилатом

При оценке послеоперационных результатов выявлено, что у 2 пациентов из 25 была миграция аллокости в просвет позвоночного канала, что составило 8%, 95,0% CI [1,0 – 26,0%], осложнение развилось за счет повреждения ножки позвонка

во время выполнения аугментации. Оба осложнения были асимптоматичными и не потребовали выполнения декомпрессии. Из 21 пациента, которым была выполнена аугментация, у 3 были отмечены признаки нестабильности фиксатора по данным КТ, что составило 14,3%, 95,0% CI [3,0 – 36,3%]. Поломки компонентов фиксатора не было выявлено, механизмом развития нестабильности было расшатывание. Из 3 пациентов только у одного – 4,7% наблюдений с 95,0% CI [0 – 23,8%] нестабильность была клинически значимой – винты верхней крайней точки фиксации изначально были расположены вблизи верхней замыкательной пластины. Постепенно, за счет прогрессирующей резорбции костной ткани, произошла перфорация замыкательной пластины и миграция винтов в смежный диск, что потребовало выполнения ревизионного вмешательства. На рисунок 7.3 проиллюстрировано наблюдение с развитием нестабильности фиксатора за счет механизма wind shield wiper effect.

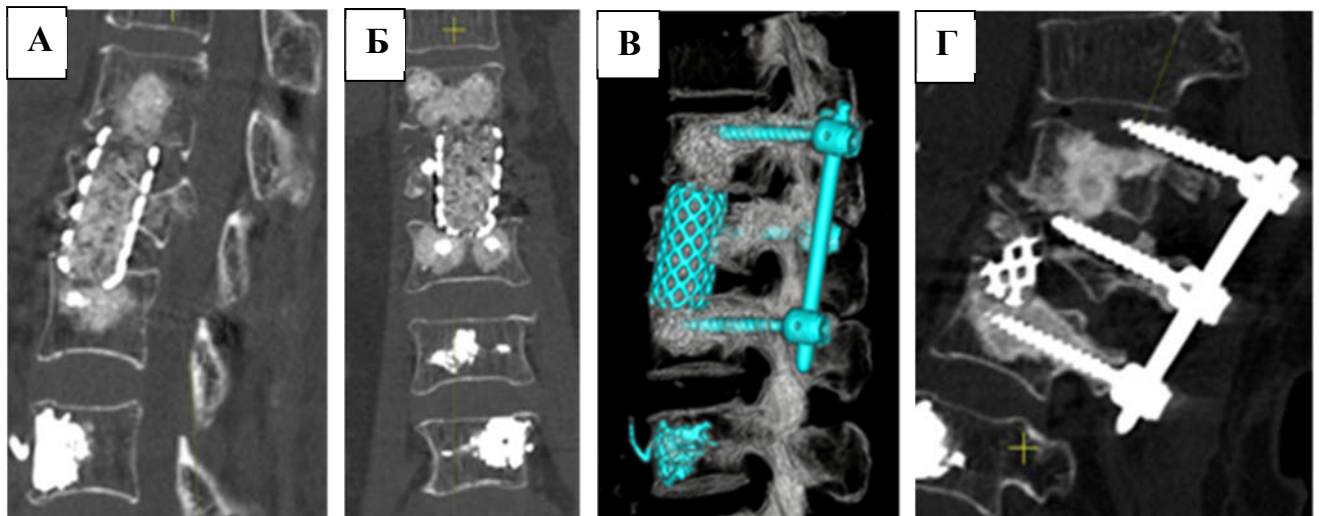


Рисунок 7.3 – Формирование нестабильности имплантатов за счет wind shield wiper effect: КТ контроль в раннем послеоперационном периоде, сагиттальная проекция (А), КТ контроль в раннем послеоперационном периоде, фронтальная проекция (Б), КТ 3D реконструкция в раннем послеоперационном периоде (В), контрольные КТ через 4 месяца – смещение винта в межпозвонковый промежуток (Г)

У остальных пациентов, которым выполнялась аугментация, за время наблюдения не отмечено резорбции материала и в итоге наблюдалась перестройка костной ткани с формированием гиперденсной области в телах позвонков.

Клиническое наблюдение 2

Больная К. 73 года, медицинская карта стационарного больного 330449, госпитализирована в нейрохирургическое отделение ФГБУ ПФМИЦ МЗ РФ 09.01.2018. В анамнезе – длительный болевой синдром (боли в области поясницы). Значительное ухудшение состояния с ноября 2017 года, травму позвоночника пациентка отрицала. Проведены повторные курсы консервативной терапии по месту жительства – без эффекта. При поступлении – группа E ASIA, аксиальный болевой синдром, ВАШ – 60 баллов, индекс ограничения жизнедеятельности Освестри – 64,0%. В связи со стойкой люмбалгией выполнена КТ, выявлен нестабильный компрессионно-оскольчатый перелом L4 позвонка на фоне остеопороза (OF4), по результатам КТ отмечено снижение плотности костной ткани до 65 HU. Методом двухэнергетической абсорбциометрии верифицирован системный остеопороз (Т-критерий = -3,5).

Предоперационные результаты КТ представлены на рисунке 7.4.

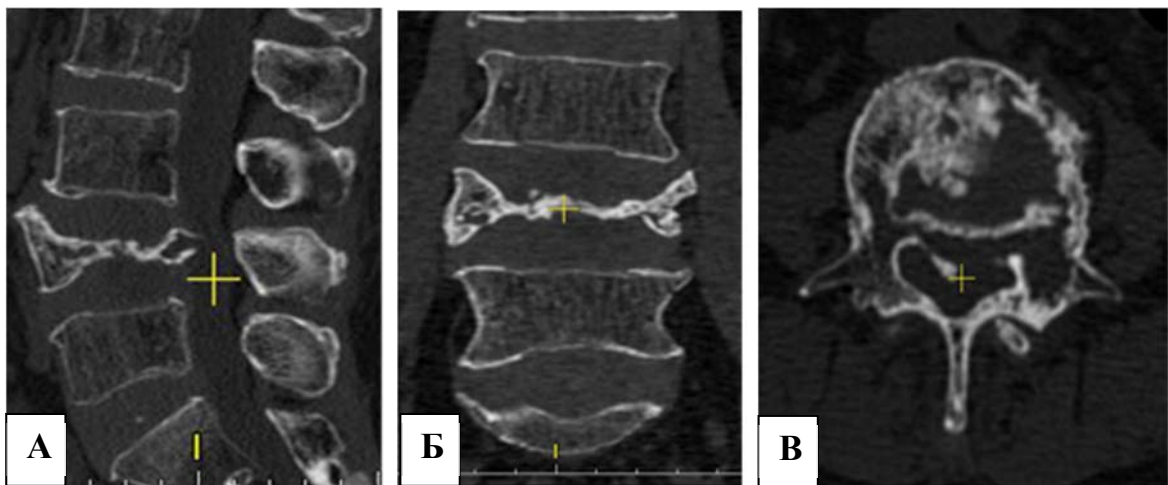


Рисунок 7.4 – Предоперационные КТ пациентки К., 73 года: сагиттальная плоскость (А), фронтальная плоскость (Б), аксиальная плоскость (В)

Установлен диагноз: постменопаузальный остеопороз позвоночника. Нестабильный компрессионно-оскольчатый патологический перелом L4 позвонка, на фоне системного остеопороза позвоночника. 10.01.2018 выполнена операция – транспедикулярная фиксация L3–L4–L5 с аугментацией позвонков костной крошкой, применена промежуточная фиксация с односторонней установкой винта

в сломанный позвонок. Также верифицировано гистологически, что причиной перелома являлся остеопороз. КТ от 21.01.2020 – признаков нарушения стабильности транспедикулярного фиксатора и прогрессирования деформации не выявлено. По данным КТ признаков резорбции костно-пластического материала не выявлено. Сформирован передний костный блок L3–L5.

Контрольные КТ в срок 2 года после операции представлены на рисунке 7.5. Срок наблюдения составил 2 года, за время наблюдения – полный регресс аксиального болевого синдрома, фиксатор стабилен.

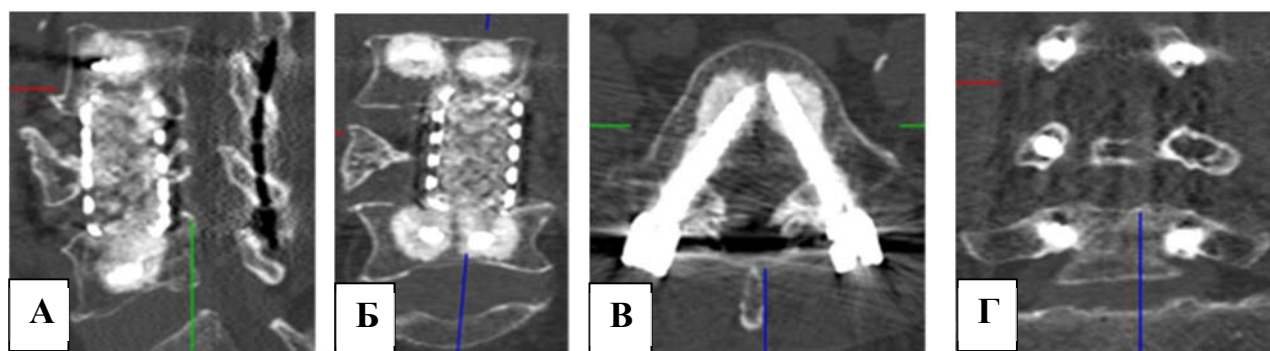


Рисунок 7.5 – Результаты контрольных КТ пациентки К., 73 года через 24 мес. после операции: сагиттальная проекция (А), фронтальная проекция (Б), аксиальная проекция (В), контрольная КТ во фронтальной проекции на уровне ножек позвонков (Г)

По сравнению с аугментацией полиметилметакрилатом разработанная методика имела ряд преимуществ:

- выполнение аугментации полиметилметакрилатом ограничено временем полимеризации: после завершения реакции его инъекция невозможна. Если во время полимеризации полиметилметакрилата закроются каналы для введения винтов, то установка фиксатора будет очень затруднена. При восстановлении опороспособности костной тканью время для выполнения аугментации не ограничено.

- если на контрольных флюорограммах или КТ выявлено неправильное положение винта, то, в случае выполнения аугментации костной тканью, можно заполнить ложный канал костной крошкой, сформировать новый по оптимальной

траектории и перепровести винт. Перепроведение винта крайне сложно выполнить после аугментации полиметилметакрилатом.

- при восстановлении опороспособности позвонков крошкой из аллокости исключено дренирование материала по сосудам, но существует другая опасность: возможен перелом ножки позвонка и миграция материала в просвет позвоночного канала. Для того, чтобы избежать осложнения необходимо контролировать целостность внутренней ножки позвонка перед выполнением аугментации.
- помимо восстановления опороспособности тела позвонка, костной крошкой можно выполнить также аугментацию ножки позвонка, соблюдая вышеуказанные меры предосторожности.

При сравнении частоты дестабилизации транспедикулярного фиксатора после аугментации полиметилметакрилатом и костной крошкой выявлено, что разработанная методика не отличается по частоте развития нестабильности фиксатора, $p = 0,3439$ (двухсторонний точный тест Фишера). При оценке статистической мощности Post-hoc для частоты дестабилизации имплантатов, ее значение составило 9,4%. Частота ревизионных вмешательств по поводу нестабильности имплантатов также не отличалась статистически значимо, $p = 0,2383$ (двухсторонний точный тест Фишера). В итоге, можно сделать вывод, что эффективность двух методик аугментации сопоставима и эффективность разработанного метода не уступает технике аугментации полиметилметакрилатом.

7.4 Эффективность методик, основанных на аугментации костной ткани

Для оценки эффективности методики аугментации тел позвонков необходимо определить, как каждый из методов влияет на частоту расшатывания транспедикулярного фиксатора, для этого проведен сравнительный анализ групп с разными методами аугментации с контрольной группой попарно. Контрольная группа состояла из 118 пациентов и включала 49 (41,5%) пациентов с дегенеративным стенозом поясничного отдела позвоночника и 69 (58,5%)

пациентов с травматическими повреждениями поясничного отдела позвоночника и грудопоясничного перехода. В этой группе у 43 (36,4%) пациентов по данным КТ выявлены признаки дестабилизации транспедикулярного фиксатора. Во всех случаях дестабилизация произошла за счет расшатывания винтов, из них у 15 пациентов (25,4%) дестабилизация была клинически значимой, этим больным были выполнены ревизионные оперативные вмешательства. Ранее было указано, что группы пациентов однородны по патологии, тем не менее, основная патология (травматическое повреждение или дегенеративная патология) тоже потенциально может влиять на результат, поэтому необходимо учитывать влияние этого фактора. Наиболее подходящим методом анализа в данном случае является общая модель логистического регрессионного анализа.

Характеристика групп пациентов представлена в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Характеристика групп пациентов

Группа	Соотношение дегенеративной патологии и травматических повреждений	Частота дестабилизации фиксатора	Частота расшатывания винтов	Частота ревизионных вмешательств по поводу нестабильности имплантатов
Аугментация полиметил-метакрилатом N=38	6/32	10 (26,3 %)	7 (18,4 %)	7 (18,4 %)
Аугментация костной крошкой N=21	5/16	3 (14,3 %)	3 (14,3 %)	1 (4,7 %)
Контрольная группа N=93	23/70	43 (36,4 %)	43 (36,4 %)	15 (25,4 %)

Примечание: в группе пациентов, которым выполнена аугментация полиметилметакрилатом у 3 пациентов выявлен усталостный перелом фиксатора.

Проведена оценка влияния аугментации тел позвонков полиметилметакрилатом на частоту дестабилизации фиксатора, с этой целью проведено сравнение этой группы пациентов с контрольной. Выполнен логистический регрессионный анализ, потенциальные предикторы,

использовавшиеся для расчета, были: основная патология пациента (дегенеративная патология или травматическое повреждение) и выполненная аугментация тел позвонков полиметилметакрилатом. В результате получена статистически значимая регрессионная модель, $\chi^2 = 9,5152$, $p = 0,0086$. Параметры общей регрессионной модели представлены в таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Параметры логистической регрессионной модели, оценивающей влияние аугментации полиметилметакрилатом на частоту дестабилизации фиксатора

Компонент регрессионного уравнения	Коэффициент и его статистическая значимость	Отношение шансов и 95% доверительный интервал
Свободный член уравнения	-0,6083 $p = 0,0447$	
Дегенеративная патология	0,8538 $p = 0,0295$	2,3486 [1,0900; 5,0603]
Аугментация полиметилметакрилатом	-0,5768 $p = 0,2016$	0,5617 [0,2309; 1,3664]

Учитывая результаты анализа, очевидно, что разница частот дестабилизации имплантатов в группах обусловлена не тем, что применена аугментация тел позвонков полиметилметакрилатом, а фактором неоднородности группы пациентов (несмотря на то, что результаты точного теста Фишера свидетельствовали об отсутствии статистически значимых отличий по пропорции дегенеративной и травматической патологии). У пациентов с дегенеративной патологией частота дестабилизации имплантатов была выше, и разница частот дестабилизации имплантатов обусловлена большей пропорцией пациентов с дегенеративной патологией в контрольной группе. При оценке влияния аугментации тел позвонков полиметилметакрилатом только на частоту расшатывания винтов, выявлено, что применение технологии статистически значимо снижает частоту именно этого вида дестабилизации. Получена статистически значимая регрессионная модель: $\chi^2 = 13,6788$, $p = 0,0011$. Параметры общей регрессионной модели представлены в таблице 7.3.

Таблица 7.3 – Параметры логистической регрессионной модели, оценивающей влияние аугментации полиметилметакрилатом на частоту расшатывания винтов

Компонент регрессионного уравнения	Коэффициент и его статистическая значимость	Отношение шансов и 95% доверительный интервал
Свободный член уравнения	0,5786 p = 0,0568	
Дегенеративная патология	-0,7994 p = 0,0437	0,4496 [0,2068; 0,9744]
Аугментация полиметилметакрилатом	1,0627 p = 0,0315	2,8941 [1,1003; 7,6118]

При оценке влияния вышеуказанных предикторов на частоту клинически значимой дестабилизации, требующей ревизионных вмешательств, статистически значимой модели не получено: $\chi^2 = 0,3515$; $p = 0,8388$. В итоге, можно сделать вывод, что аугментация полиметилметакрилатом снижала частоту расшатывания винтов, но влияла на общую частоту дестабилизации имплантатов вследствие того, что в группе пациентов, у которых применена эта технология, были наблюдения с усталостным переломом фиксатора. Также аугментация позвонков полиметилметакрилатом не оказала значимого влияния на частоту клинически значимой дестабилизации транспедикулярного фиксатора.

Выполнена оценка влияния аугментации тел позвонков костной крошкой на частоту дестабилизации фиксатора, с этой целью проведено сравнение данной группы пациентов с контрольной. Потенциальные предикторы, использовавшиеся для расчета, также же, что и в предыдущем случае: основная патология и выполненная аугментация тел позвонков костной крошкой. В результате получена статистически значимая регрессионная модель, $\chi^2 = 14,5345$, $p = 0,0007$. Параметры общей регрессионной модели представлены в таблице 7.4.

Таблица 7.4 – Параметры логистической регрессионной модели, оценивающей влияние аугментации костной крошкой на частоту расшатывания транспедикулярных винтов

Компонент регрессионного уравнения	Коэффициент и его статистическая значимость	Отношение шансов и 95% доверительный интервал
Свободный член уравнения	-0,6977 p = 0,0267	
Дегенеративная патология	-1,0169 p = 0,0143	0,3617 [0,1610; 0,8126]
Аугментация костной крошкой	1,5175 p = 0,0254	4,5608 [1,2100; 17,1906]

При выполнении анализа учтена неоднородность пациентов по патологии. Согласно данным регрессионного анализа, аугментация тел позвонков костной крошкой статистически значимо снижает частоту расшатывания транспедикулярных винтов. Дегенеративная патология является дополнительным фактором риска, с которым связано увеличение частоты дестабилизации фиксатора. При оценке влияния этих факторов на частоту клинически значимой дестабилизации винтов, не получено статистически значимой модели ($\chi^2 = 2,4352$, $p = 0,2959$), что может свидетельствовать как о независимости частоты клинически значимой дестабилизации транспедикулярного фиксатора от предполагаемых факторов риска, так и о недостаточном количестве пациентов для оценки влияния на частоту развития клинически значимой нестабильности фиксатора.

7.5 Обсуждение результатов

Остеопороз является часто встречающимся заболеванием в пожилом возрасте, в этой же группе пациентов распространены дегенеративные заболевания, которые при нестабильности сегментов требуют применения транспедикулярной фиксации и спондилодеза. Также нередко встречаются и патологические низкоэнергетические переломы, часть из которых может быть нестабильной, и требующей применения транспедикулярной фиксации. При остеопорозе прогрессивно снижается прочность губчатой костной ткани позвонков, что, в итоге, снижает прочность фиксации винта в костной ткани и приводит к дестабилизации фиксатора.

В результате биомеханических исследований доказано, что по способности увеличивать прочность фиксации аугментация костной ткани полиметилметакрилатом превосходит все другие методики в тестах на вырывание, также аугментация полиметилметакрилатом увеличивает устойчивость винтов в тестах с циклической краниокаудальной нагрузкой, [117, 274, 321]. С другой стороны, аугментация позвонков ПММА меняла биомеханику транспедикулярной фиксации, смещая точку опоры вентрально, что в итоге способствовало проксимальному расшатыванию винтов [298, 321].

По результатам выполненного исследования в группе пациентов, которым проводилась аугментация полиметилметакрилатом, рентгенологические признаки дестабилизации отмечены в 26,3% наблюдений, из всех наблюдений с расшатыванием транспедикулярного фиксатора 18,6% были клинически значимыми и потребовали ревизионного вмешательства. Расшатывание происходило как у пациентов с вертебропластической техникой аугментации, так и после введения полиметилметакрилата через канюлированные фенестрированные винты, несмотря на достаточный объем цемента для восстановления опороспособности. У пациентов с расшатыванием транспедикулярного фиксатора, установленного на костный цемент, отличалась локализация резорбции костной ткани. Рентгенпрозрачная зона вокруг винтов была конической, расширяющаяся дорзально и максимально выраженная в ножках позвонков. Ранее в двух работах объяснено такое расшатывание аугментированных винтов: при смещении точки опоры вентрально увеличивается нагрузка на винты и увеличивается микроподвижность в области ножки позвонка, вызывая проксимальное расшатывание [298, 321].

Известно, что у пациентов с нарушением плотности костной ткани есть дополнительный фактор риска развития нестабильности оперированных сегментов. При снижении плотности костной ткани замедляется скорость формирования костного блока, что может привести к возрастанию количества усталостных переломов фиксатора [35]. И перелом компонентов стабилизирующей системы, и клинически значимое расшатывание винтов приводят к необходимости

ревизионного оперативного вмешательства, вследствие чего нецелесообразно изучать эти осложнения по отдельности в контексте результатов хирургического лечения пациентов с нарушением плотности костной ткани. По результатам выполненного исследования, установка транспедикулярных винтов на костный цемент статистически значимо снижала частоту расшатывания винтов по данным КТ, но не уменьшала общую частоту дестабилизации транспедикулярного фиксатора за счет того, что в исследуемой группе отмечены случаи усталостного перелома компонентов фиксирующей системы. Если принимать во внимание только клинически значимые наблюдения со всеми видами дестабилизации фиксатора, требующими ревизионного вмешательства, то результаты анализа позволяют сделать заключение, что аугментация костной ткани не оказала влияния на частоту клинически значимых осложнений. Причиной таких результатов может быть относительно низкая частота осложнений, требующих ревизии инструментария что может потребовать увеличения выборки пациентов для дальнейшего изучения.

При том, что аугментация полиметилметакрилатом наиболее эффективный метод для увеличения прочности фиксации винтов в костной ткани, эта методика имеет и недостатки, которые могут привести к осложнениям. Осложнения связаны с дренированием полиметилметакрилата в сосудистое русло или через трещины кортикального слоя позвонка. При дренировании цемента в позвоночный канал имеется существенный риск повреждения невралных структур как за счет их компрессии, так и за счет термического и химического воздействия [76, 212]. В работе В.А. Georgy (2010) присутствует попытка классифицировать интраканальное дренирование цемента по его степени, но остается неясной клиническая значимость такой классификации [137]. По этой причине в ходе работы использована упрощенная классификация, учитывались только наблюдения с экстенсивным дренированием цемента, поскольку только в этих случаях имеется риск повреждения корешков и спинного мозга [241]. Ранее было проведено исследование и выявлено, что на частоту дренирования в эпидуральное пространство влияют такие факторы, как близость вертебропластической иглы к

средней линии и тип строения венобазиллярной системы. Чем ближе игла к средней линии, тем чаще происходило дренирование В типа. Магистральный тип строения венобазиллярной системы также является фактором риска дренирования цемента в позвоночный канал [313]. Оценка факторов, влияющих на дренирование цемента в позвоночный канал при транспедикулярной фиксации с установкой винтов на цемент, в значительной степени дублировала ранее полученные результаты на группе пациентов, которым выполнялась вертебропластика. В итоге выявлено, что магистральный тип строения венобазиллярной системы является фактором риска дренирования цемента в позвоночный канал при выполнении установки транспедикулярных винтов на цемент. Для оценки риска осложнения также можно использовать максимальный размер питающего отверстия венобазиллярной системы: чем больше диаметр самого крупного питающего отверстия, тем больше вероятность дренирования цемента в позвоночный канал.

Дренирование через сегментарные сосуды (S тип) может привести к такому опасному осложнению, как цементная легочная эмболия. Частота легочной эмболии после транспедикулярной фиксации с установкой винтов на цемент на основе полиметилметакрилата, по данным исследований, составляет 4,1 – 28,6% [77, 169, 197, 300]. Такой разброс данных обусловлен тем, что в послеоперационном периоде не проводится скрининг, направленный на выявление описанного осложнения, а подавляющее большинство этих наблюдений асимптоматично. Тем не менее, опубликованы данные, согласно которым у 1,2% пациентов цементная эмболия является угрозой жизни, сопровождаясь нарушением гемодинамики, и даже описаны летальные исходы [273]. По результатам выполненного исследования, цементная эмболия составила 8,7% наблюдений, только у одного пациента осложнение было клинически значимым и сопровождалось торакалгией. Наиболее вероятными причинами осложнения могли быть избыточное введение цемента и наличие дополнительных анастомозов между системой полых вен и легочной циркуляцией у пациентов с сердечно-сосудистой патологией [8]. Помимо цементной эмболии описана группа осложнений после хирургических вмешательств на костной системе с применением аугментации

полиметилметакрилатом, которую называли синдром имплантации цемента [70, 173]. Зарегистрированы случаи гипотензии, случаи развития сердечной недостаточности, гипоксии, инфаркта миокарда и внезапной смерти после применения аугментации костной ткани полиметилметакрилатом [173, 241]. За время проведения исследования подобных осложнений не отмечено. В связи с тем, что аугментация винтов ПММА не решает в полной мере проблему дестабилизации фиксатора, а также принимая во внимание риск осложнений, обусловленных применением ПММА, включая те, которые обусловлены дренированием цемента в сосудистое русло, разработан альтернативный способ аугментации костной ткани без применения жидких и цитотоксичных веществ. Поставленный технический результат достигался за счет того, что на уровнях введения винтов с двух сторон через ножки позвонков формируют каналы для доступа в тела позвонков, поочередно через сформированные каналы транспедикулярно в тела позвонков устанавливают костную воронку, через которую импактором вводят костную крошку в тело позвонка и уплотняют их, после чего заполняют костной крошкой ножки позвонков, повторно формируют каналы для ввода винтов, в подготовленных каналах нарезают резьбу, транспедикулярно проводят винты и фиксируют головки винтов к стержням, получен патент на изобретение (патент на изобретение «Способ стабилизации позвоночно-двигательного сегмента транспедикулярным инструментарием у пациентов с остеопорозом позвоночника» RU 2 663 940, зарегистрирован в Федеральной службе по интеллектуальной собственности Российской Федерации, опубликован: 13.08.2018 Бюл. № 23), методика применяется с 2017 года. Разработанный в ходе выполнения работы способ, отличается от аналога, применявшегося во время биомеханического тестирования. Предложенный способ позволял создать в теле позвонка большую область импактированной аллокости, которая многократно превышала объем винта, и иногда распространялась от краниальной до каудальной замыкательной пластины. За время наблюдения не происходила резорбция аллокости, а по данным КТ происходила ее перестройка с формированием гиперденсной области в теле и

ножке позвонка. Возможно, такая техника и обеспечила результаты, не отличающиеся от полученных в результате аугментации полиметилметакрилатом. Ограничением применения разработанной техники являлась толщина ножки позвонка: она должна была быть достаточной, чтобы обеспечить безопасное введение костной воронки. Разработанная методика позволила уменьшить частоту расшатывания транспедикулярных винтов по результатам КТ, но не повлияла значительно на частоту ревизионных вмешательств по поводу дестабилизации фиксатора. Единственный случай значимой дестабилизации винтов после аугментации аллокостью был обусловлен описанным в литературе так называемым *windshield wiper effect* – эффектом очистителя лобового стекла. В этом случае винт в области верхней точки фиксации прорезает верхнюю замыкательную пластину и мигрирует в смежный диск [117, 145]. У пациента, у которого было выявлено это осложнение изначально винты верхней точки фиксации были расположены вблизи верхней замыкательной пластины, что, вероятно, способствовало развитию осложнения.

В итоге и аугментация полиметилметакрилатом, и аугментация с использованием аллокости, оказывая сопоставимый эффект, привели к снижению частоты расшатывания винтов, но не влияли на частоту клинически значимой дестабилизации фиксатора. Результаты иллюстрируют, что методики имеют вспомогательное значение и необходимы для обеспечения стабильности фиксации на время формирования костного блока. При псевдоартрозе в итоге происходит или усталостный перелом фиксатора, или отсроченное расшатывание фиксатора, которое будет преимущественно проксимальным, если аугментация проведена не полностью на всей траектории установки винта.

ГЛАВА 8 РЕВИЗИОННЫЕ ВМЕШАТЕЛЬСТВА У ПАЦИЕНТОВ С ОГРАНИЧЕНИЕМ ПЛОТНОСТИ КОСТНОЙ ТКАНИ

8.1 Характеристика и особенности исследования

Несмотря на современное развитие хирургии позвоночника, до настоящего времени сохраняется значительная частота дестабилизации фиксатора, которая может превышать 50 % у пациентов с остеопорозом позвоночника. В настоящее время рекомендован ряд стратегий для выполнения ревизионных вмешательств. Наиболее часто используются бикортикальная фиксация, использование винтов большего диаметра или расширяющихся винтов, аугментация костным цементом, перепроведение винтов по альтернативной траектории [106]. Недостатком большинства исследований является фрагментарное изучение проблемы без учета всех факторов, которые могут способствовать дестабилизации фиксатора. В этих случаях нестабильность может повториться, а значительная деструкция в области ножек позвонков может сделать невыполнимыми указанные ранее технические решения. Известно, что некоторые из них имеют повышенный риск осложнений, таких, как ранение магистральных сосудов при бикортикальной установке винтов, перелом кортикального слоя кости ножки при использовании винтов большего диаметра и расширяющихся винтов, дренирование цемента в позвоночный канал. Кроме того, дестабилизация имплантатов может повторяться, и поэтому обсуждается пригодность всех технических решений к повторным ревизиям, в частности, насколько легко будет выполнить ревизию расширяющихся винтов и аугментированных полиметилметакрилатом.

Одной из задач исследования является разработка техники ревизионных вмешательств при нестабильности имплантатов.

Данный фрагмент исследования представляет собой серию наблюдений. Какой-либо статистический анализ является неприменимым в этом случае, поскольку стандартизация наблюдений невозможна и техника отличается от случая

к случаю. Ревизионные оперативные вмешательства выполнены у пациентов, включенных во фрагмент работы, необходимой для оценки факторов риска дестабилизации транспедикулярного фиксатора при травматической и дегенеративной патологии, а также для изучения результатов применения техник, основанных на аугментации костной ткани.

Просуммировать и систематизировать применяющиеся стратегии можно следующим образом:

- Восстановление опороспособности ножки и тела позвонка;
- Оптимальное перераспределение нагрузки на винты, с уменьшением плеча рычага;
- Обеспечение перераспределения нагрузки на винты, применением межтеловых имплантатов
- Обеспечение циркулярного спондилодеза;
- Технические решения при переломах винтов, позволяющие избежать травматичных остеотомий.

При необходимости возможно применение нескольких стратегий, но всегда должно быть сбалансированное решение, поскольку чаще всего дестабилизация имплантатов наблюдается у пациентов пожилого возраста на фоне остеопороза. В некоторых случаях результата можно достигнуть без непосредственного вмешательства на расшатанном транспедикулярном фиксаторе.

Клиническое наблюдение 3

Пациентка А., 1951 г.р. травма в результате падения с высоты 3 этажа. Госпитализирована 11.01.2012. При поступлении: неврологически – группа С ASIA, по данным КТ выявлен нестабильный компрессионно-оскольчатый перелом L4 позвонка, тип А4 с посттравматическим стенозом позвоночного канала. Пациентке была выполнена задняя микрохирургическая декомпрессия корешков на уровне L4 – ламинэктомия L4 с двухсторонним удалением дугоотростчатых суставов L3 – L4, L4 – L5 и выполнена транспедикулярная фиксация L3 – L4 с

установкой поперечного коннектора. В послеоперационном периоде у пациентки сохранялась неврологическая симптоматика. С течением времени развилась нестабильность фиксатора – расшатывание винтов.

Результаты контрольных КТ после первичного декомпрессивно-стабилизирующего вмешательства приведены на рисунке 8.1.

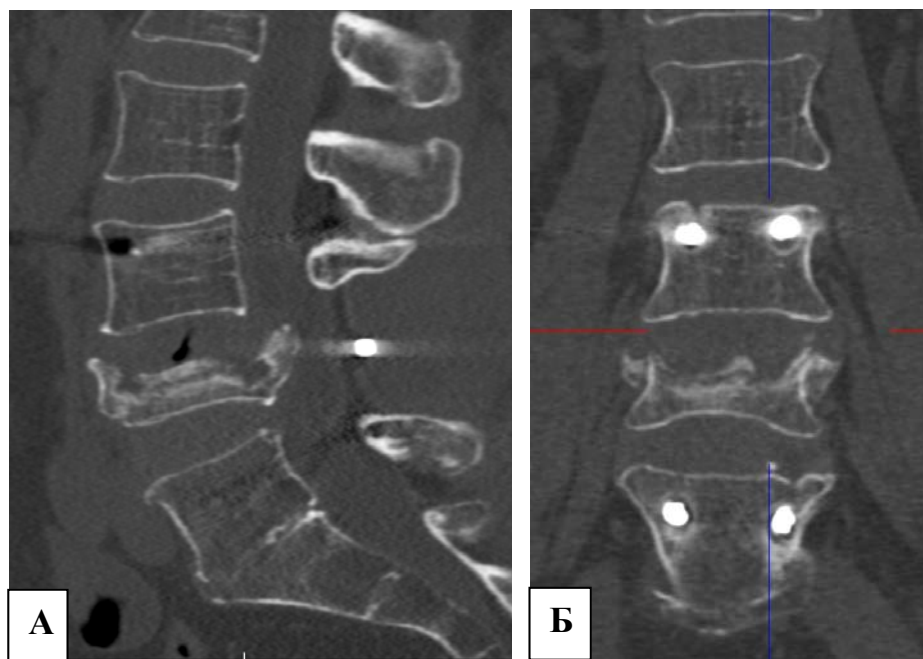


Рисунок 8.1 – Результаты контрольных КТ после первичного декомпрессивно-стабилизирующего вмешательства: КТ реконструкция в сагиттальной плоскости (А), КТ реконструкция во фронтальной плоскости, видна рентгенпрозрачная область вокруг винтов (Б)

Пациентка была повторно госпитализирована в отделение 06.08.2012. Учитывая сопутствующую патологию (ИБС, постинфарктный кардиосклероз с сердечной недостаточностью Н2А), принято решение об этапном лечении. Первым этапом было решено выполнить переднюю микрохирургическую декомпрессию корешков на уровне L4, передний спондилодез сетчатым имплантатом с костнозамещающим материалом.

Пациентке был выполнен передний забрюшинный доступ, частичная корпэктомия L4 позвонка с резекцией костных отломков, смещенных в позвоночный канал. Принимая во внимание снижение плотности костной ткани до 53 HU, была выполнена аугментация позвонков L3, L5 костным цементом из

переднего доступа, после этого на дистракции был установлен сетчатый имплантат с костнозамещающим материалом, таким образом выполнен передний спондилодез. После операции у пациентки отмечен полный регресс неврологической симптоматики и аксиального болевого синдрома. Принято решение о наблюдении в динамике. На рисунке 8.2 представлены результаты контрольных КТ.

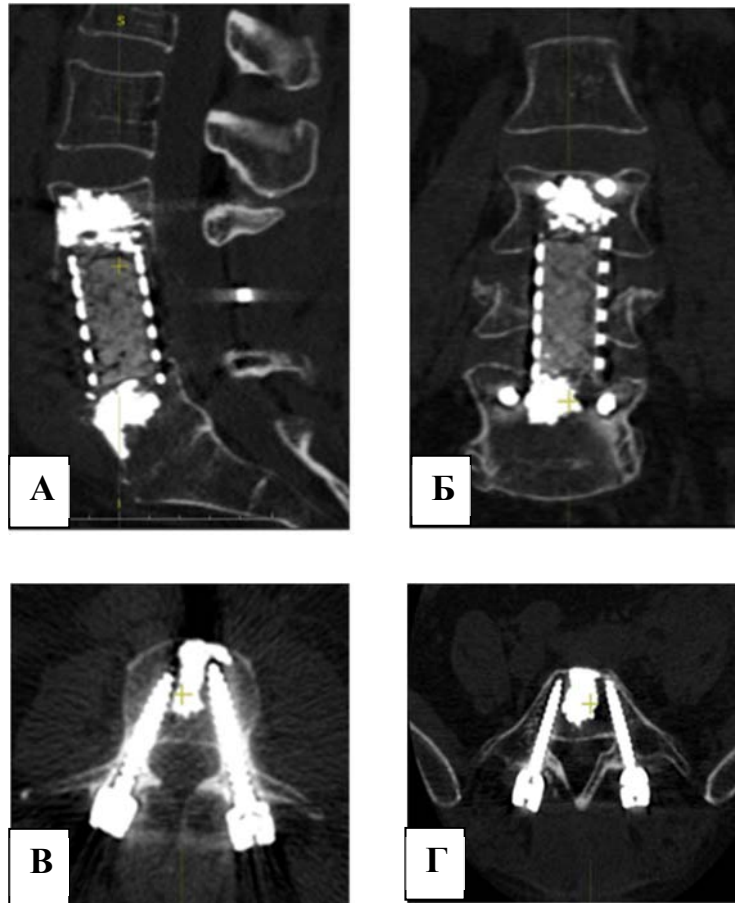


Рисунок 8.2 – Результаты контрольных КТ после ревизионного вмешательства: КТ реконструкция в сагиттальной плоскости (А), во фронтальной плоскости (Б), в аксиальной плоскости на уровне винтов L3 (В), в аксиальной плоскости на уровне винтов L4 (Г)

За время наблюдения, составившего 8 лет, сформировался передний костный блок, нестабильности межтелового имплантата не отмечено.

Клиническое наблюдение 4

Пациентка Б, 40 лет, получила травму 16.11.2012 в результате падения с 4 этажа. Травма была сочетанная, и с места происшествия больная была доставлена в стационар по месту жительства, где было выполнено ушивание разрыва печени. В связи с диагностированным переломом L2 позвонка, осложненным ушибом корешков и спинного мозга переведена была на лечение в институт травматологии и ортопедии. При поступлении: неврологически – группа В ASIA, по данным КТ – нестабильный компрессионно-оскольчатый перелом L2 позвонка типа С (L2 A4 тип). 14.12.2012 пациентке была выполнена циркулярная декомпрессия спинного мозга на уровне L2, транспедикулярная фиксация Th12–L1–L3–L4. В ходе оперативного лечения выполнена экстенсивная декомпрессия корешков и спинного мозга: удалена дуга L2 позвонка, дугоотростчатые суставы на уровне L1–L2, L2–L3, из заднего доступа резецировано тело L2 позвонка и выполнен межтеловой спондилодез сетчатым имплантатом L1–L3 также из заднего доступа. Послеоперационные КТ представлены на рисунке 8.3.

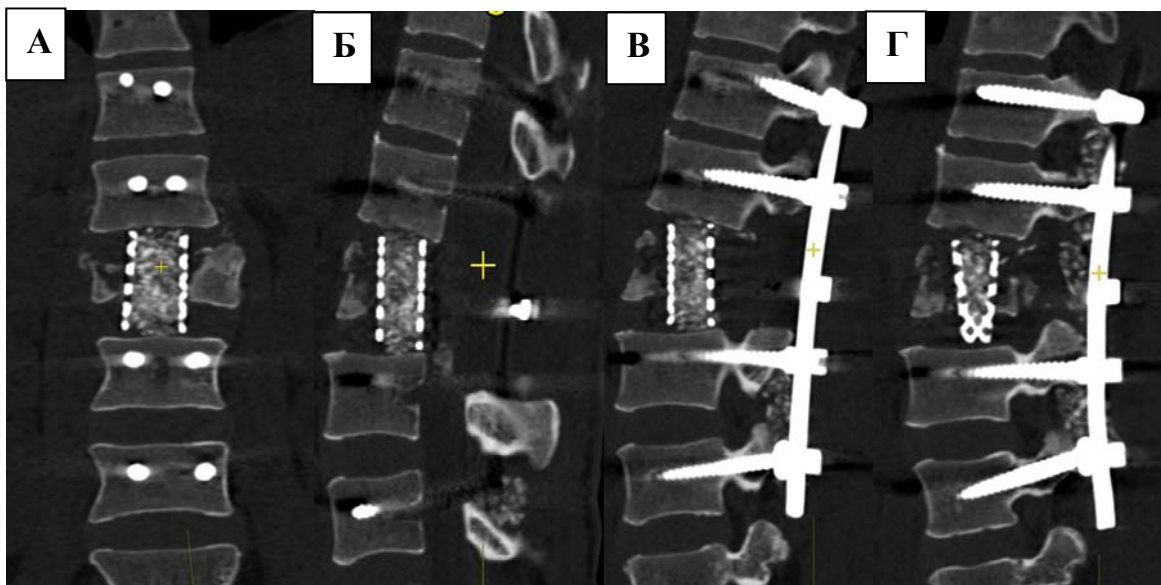


Рисунок 8.3 – Результаты контрольных КТ пациентки Б., 40 лет: реконструкция во фронтальной плоскости (А), в сагиттальной плоскости (Б), положение винтов (В, Г)

В послеоперационном периоде отмечена положительная динамика – частичный регресс неврологической симптоматики. При контрольном осмотре в

2013 году – группа С ASIA. В 2014 году произошло увеличение интенсивности аксиальных болей, ВАШ 70 баллов. На контрольных спондилограммах и КТ выявлен перелом стержней на уровне L2. Контрольные МСКТ и контрольная спондилограмма – профиль представлены на рисунке 8.4.

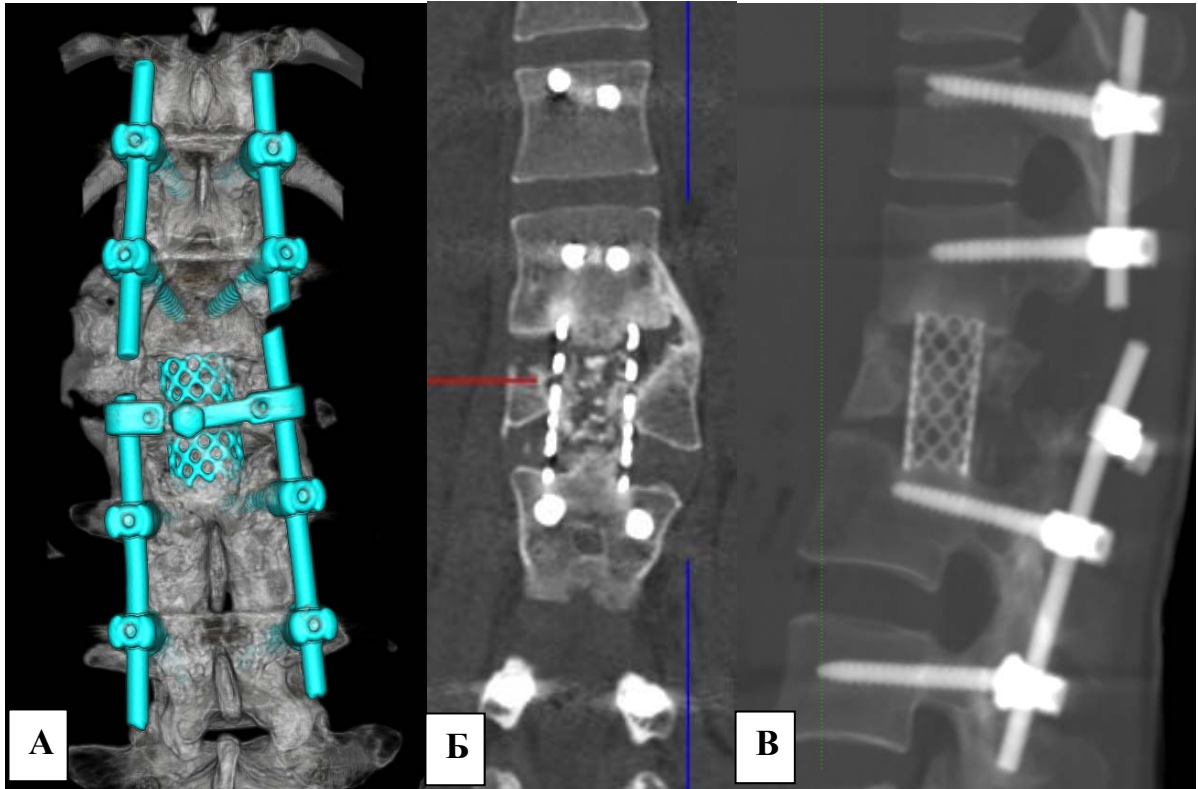


Рисунок 8.4 – Результаты контрольного КТ-исследования в 2014 году после первичного декомпрессивно-стабилизирующего вмешательства: 3D реконструкция контрольных КТ (А), КТ реконструкция во фронтальной плоскости (Б), контрольная спондилограмма (профиль) (В)

10.07.2014 года выполнено ревизионное вмешательство – замена транспедикулярного фиксатора, повторная транспедикулярная фиксация L1–L3 (уменьшена протяженность фиксации до L1–L3). Краткосрочно отмечен регресс аксиального болевого синдрома, который возобновился в 2015 году. При посещении на амбулаторном приеме: неврологически – группа С, интенсивность боли по ВАШ 80 баллов, аксиальный болевой синдром. Результаты контрольных КТ представлены на рисунке 8.5. По данным контрольных КТ произошло

вырывание стержней из головок винтов на уровне L3, признаки псевдоартроза L1–L2–L3.

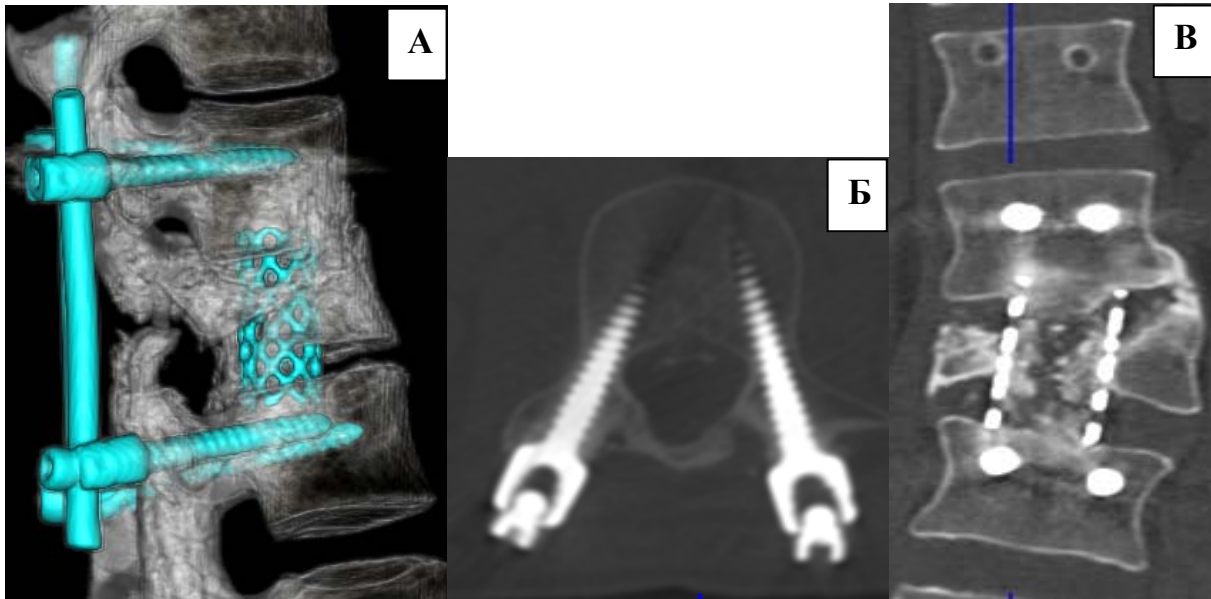


Рисунок 8.5 – Контрольные КТ, после ревизионного вмешательства от 2014 года: КТ 3D реконструкция (А), вырванные гайки из головок винтов L3 (Б), неполный костный блок, резорбция аутокости (В)

Учитывая повторную нестабильность имплантатов принято решение о следующей тактике: уменьшить рычаг, воздействующий на винты путем выполнения промежуточной фиксации (дополнительно ввести винт во фрагмент L2 позвонка, обеспечить формирование переднего костного блока за счет аутотрансплантата, помещенного в межпозвонковые промежутки L1–L2, L2–L3. 10.06.2015 пациентке выполнено ревизионное вмешательство. Контрольные КТ представлены на рисунке 8.6.

Срок наблюдения составил 5 лет, на контрольных КТ отмечено формирование костного блока, признаков нестабильности фиксатора не отмечено. В случае расшатывания винтов в ножках и телах позвонков возможно восстановление опороспособности путем аугментации аллокостью, тем не менее, и в этом случае необходимо обеспечение формирования костного блока – переднего или заднего.

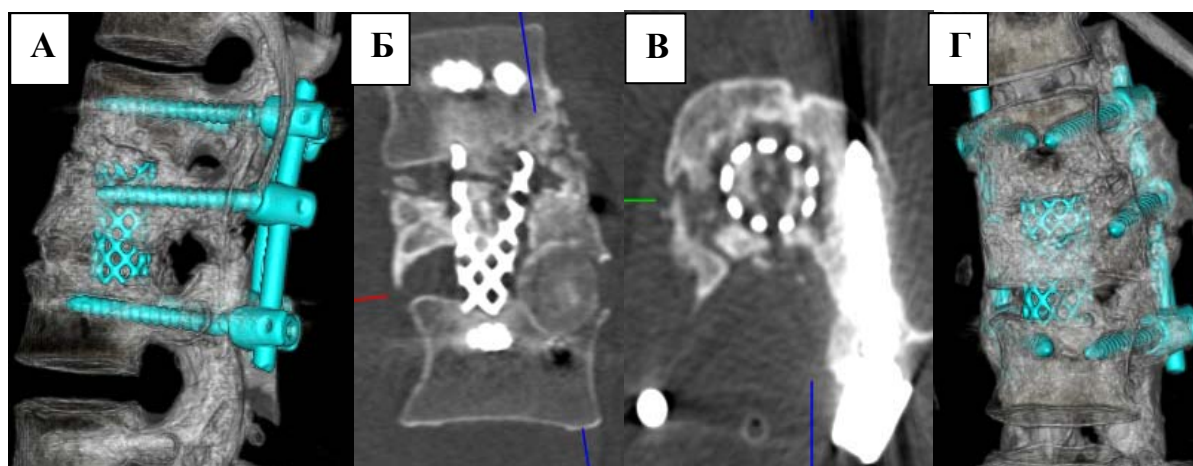


Рисунок 8.6 – Послеоперационный контроль после выполнения ревизионного вмешательства 10.06.2015: КТ 3D реконструкция – установлен винт во фрагмент L2 позвонка (А), КТ во фронтальной плоскости. Установлен аутографт в промежутки L1–L2 (крошка), L2–L3 – трансплантат (Б), КТ в аксиальной плоскости положение винта в L2 позвонке (В), КТ 3D реконструкция (Г)

Клиническое наблюдение 5

Пациентка П., 45 лет, травма в результате падения с высоты 10.12.2017 года, выявлен перелом позвонка Th12, тип А4, по поводу травмы пациентке 14.12.2017 была выполнена транспедикулярная фиксация на уровне Th11–Th12–L1, но через 6 месяцев отмечено развитие нестабильности винтов. 02.05.2018 года выполнена повторная транспедикулярная фиксация на уровне Th10–Th11–L1–L2 с установкой винтов на костный цемент на основе полиметилметакрилата, однако, повторно развилась нестабильность фиксатора с миграцией винтов, в связи с чем пациентка была направлена в институт травматологии и ортопедии. При поступлении – группа E ASIA (признаков радикулопатии и миелопатии не выявлено), интенсивный аксиальный болевой синдром, ВАШ 90 баллов индекс ограничения жизнедеятельности Освестри 100 %. На КТ – выявлен лизис тела Th12 позвонка, расшатывание винтов, на уровне Th10 – эффект очистителя лобового стекла (windshield wiper effect, англ.) – винты прорезались через верхнюю замыкательную пластину.

Результаты предоперационных исследований представлены на рисунке 8.7. 8.7А, 8.7В – результаты рентгенографии позвоночника, 8.7В, 8.7Г – результаты КТ.

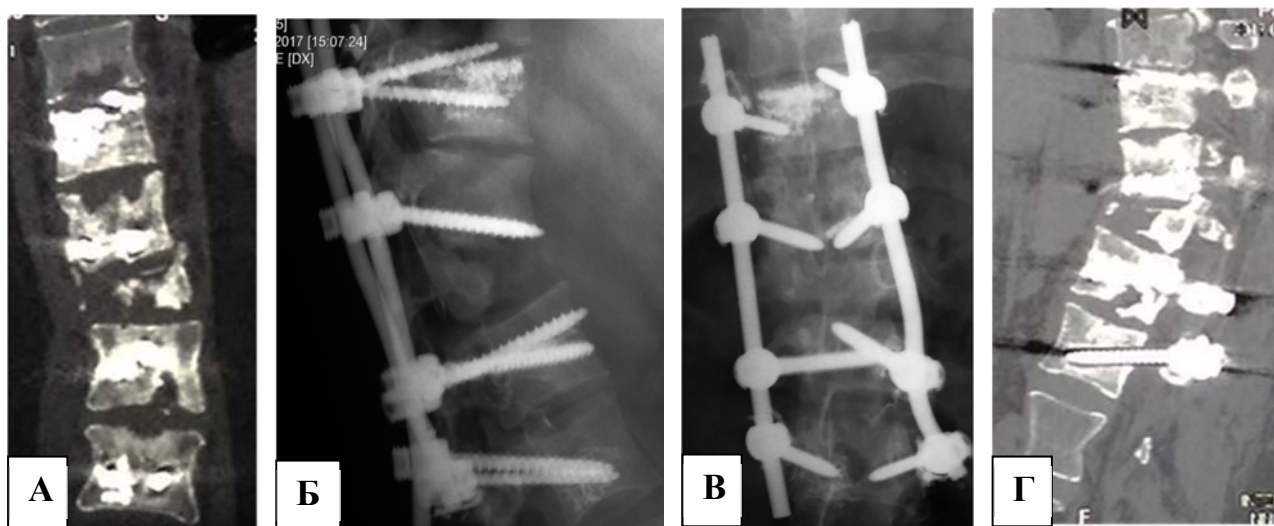


Рисунок 8.7 – Результаты предоперационного исследования: рентгенограмма в прямой проекции (А), рентгенограмма в профиль (Б), КТ в сагиттальной плоскости (В), КТ во фронтальной плоскости (Г)

Принято решение о ревизионной тактике – удалить фиксатор, выполнить восстановление опороспособности ножек и тел позвонков за счет импактирования крошки из аллокости в дефекты и повторно выполнить фиксацию, используя винты максимального диаметра. Первый этап оперативного лечения выполнен 01.09.2017, после этого, отсрочено было решено выполнить передний спондилодез с замещением тела Th12 позвонка сетчатым имплантатом с аллокостью и выполнением спондилодеза на смежных уровнях Th10–Th11 и L1–L2 кейджами для DLIF с аллокостью. Второй этап оперативного вмешательства выполнен 23.10.2017. На рисунке 8.8 представлен КТ-контроль.

Длительность наблюдения составила 3 года, на контрольных КТ – формирование костного блока, признаков нестабильности фиксатора не отмечено. Аксиальный болевой синдром регрессировал, ВАШ 20 баллов, индекс ограничения жизнедеятельности Освестри 24,0%.

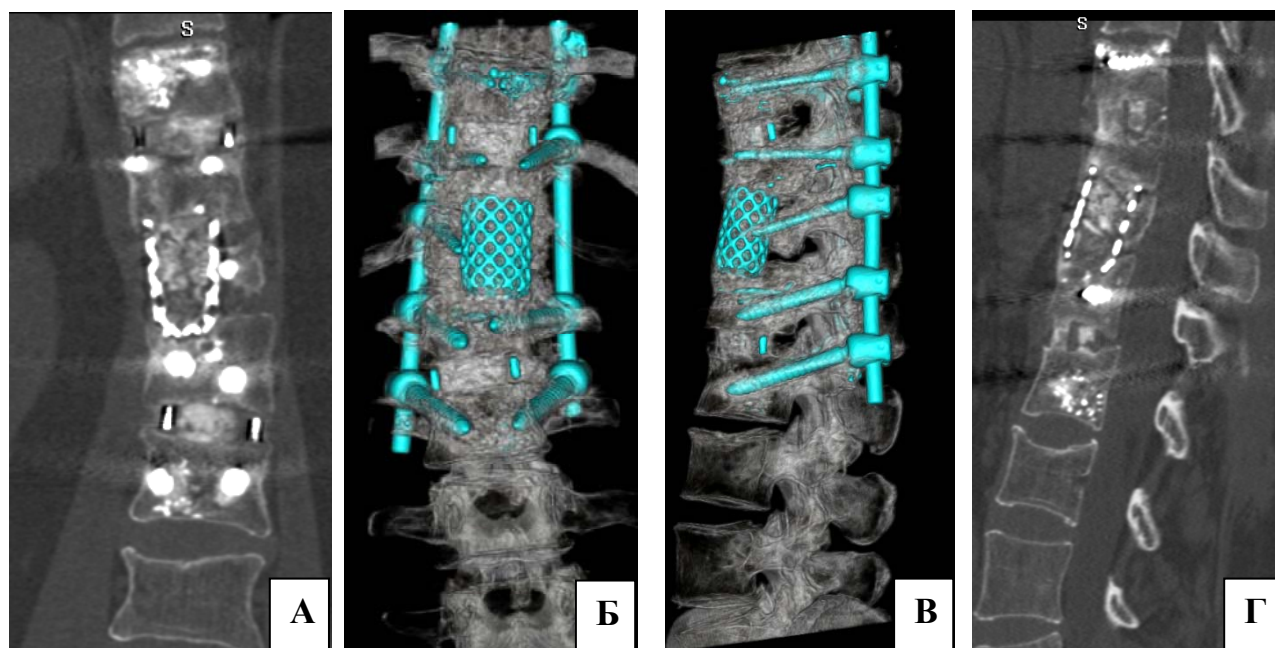


Рисунок 8.8 – Послеоперационный КТ контроль после двухэтапного реконструктивного вмешательства: 3D КТ реконструкция (А, Б), КТ в сагиттальной плоскости (В), КТ во фронтальной плоскости (Г)

Техническое решение с пластикой дефекта аутотрансплантатами можно применять при нестабильности межтеловых ксенотрансплантатов.

На рисунке 8.9 представлены контрольные КТ пациента, которому по поводу перелома L2 позвонка типа А4 были выполнены транспедикулярная фиксация на уровне L1–L3, передний спондилодез L1–L3 имплантатом из пористого никелида титана. У пациента отмечается формирование нестабильности межтелового имплантата: отчетливо определяется диастаз между межтеловым имплантатом и телом позвонка L1. Это являлось причиной аксиального болевого синдрома с интенсивностью боли по ВАШ 60 баллов, индекс ограничения жизнедеятельности Освестри 56,0%.

У пациента была снижена плотность губчатой костной ткани тела позвонка до 33 НУ.

В связи с интенсивным болевым синдромом было выполнено ревизионное вмешательство: диастаз между трансплантатом и телом L1 позвонка был заполнен аутокостью (Рисунок 8.10).

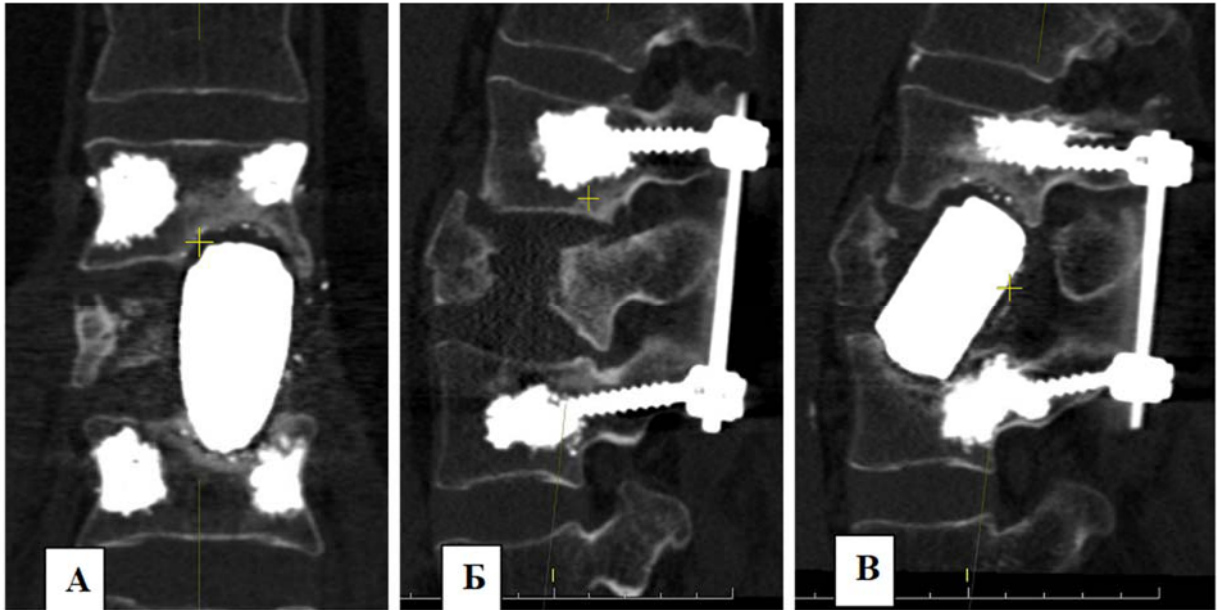


Рисунок 8.9 – Результаты КТ перед выполнением ревизионного вмешательства: КТ во фронтальной проекции (А), в косой проекции по траектории винтов (Б, В)

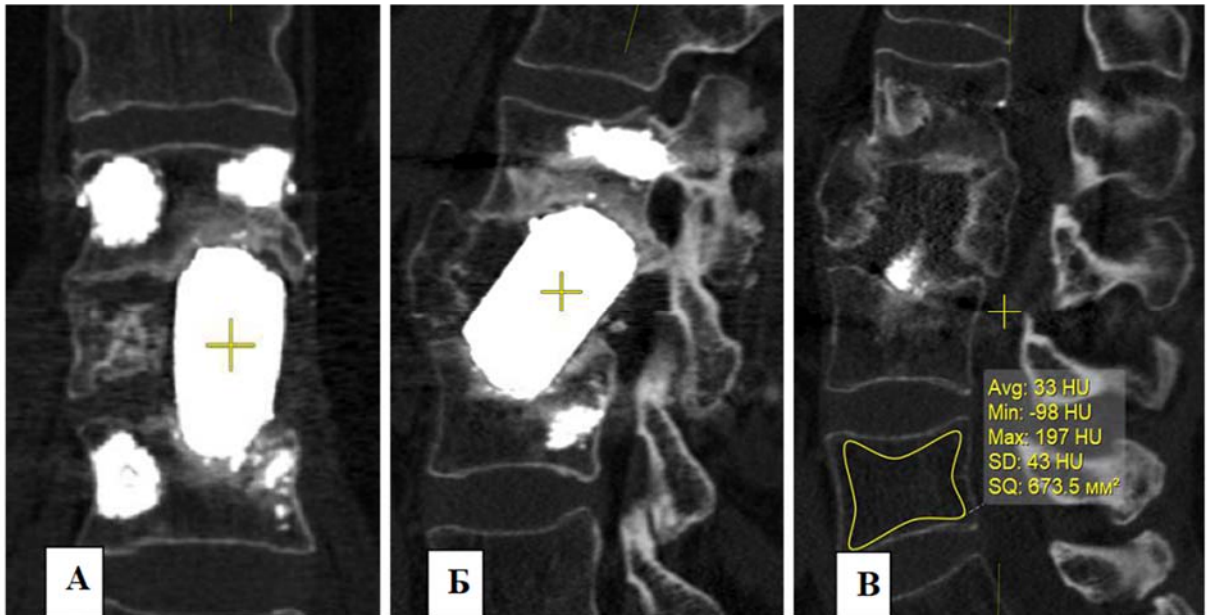


Рисунок 8.10 – Контрольные КТ после ревизионного вмешательства с замещением дефекта и аугментацией аллокостью: КТ во фронтальной проекции (А), в сагиттальной проекции (Б), в сагиттальной проекции парамедианно (В)

Чтобы увеличить опороспособность тела позвонка, аутокость была импактирована в тело L1 позвонка, таким образом была увеличена его опороспособность. Также был замещен аутокостью дефект между телом L1 позвонка и ксенотрансплантатом. В итоге было достигнуто формирование переднего костного блока, что было подтверждено результатами контрольных КТ.

Восстановление опороспособности ножки позвонка возможно и костным цементом, но выполнение этого способа значительно затруднит кровотоечение из канала винта, которое усиливается после удаления грануляционных тканей. Винт должен быть достаточного диаметра, чтобы сработать как поршень, создавая давление для пропитывания цементом окружающей костной ткани. Таких наблюдений, требующих ревизионного вмешательства меньшинство. На рисунке 8.11 А и Б представлены результаты ревизионного вмешательства с применением полиметилметакрилата. Техника восстановления опороспособности винтов с применением цемента на основе полиметилметакрилата будет практически невыполнимой, если ранее применялась бикортикальная установка винтов. В этом случае цемент будет выдавливаться в забрюшинное пространство, а аугментация будет неэффективной (Рисунок 8.11В) Альтернативным решением в этом случае может быть применение расширяющихся винтов. На рисунке 8.11Г представлен результат технического решения с применением расширяющихся винтов.

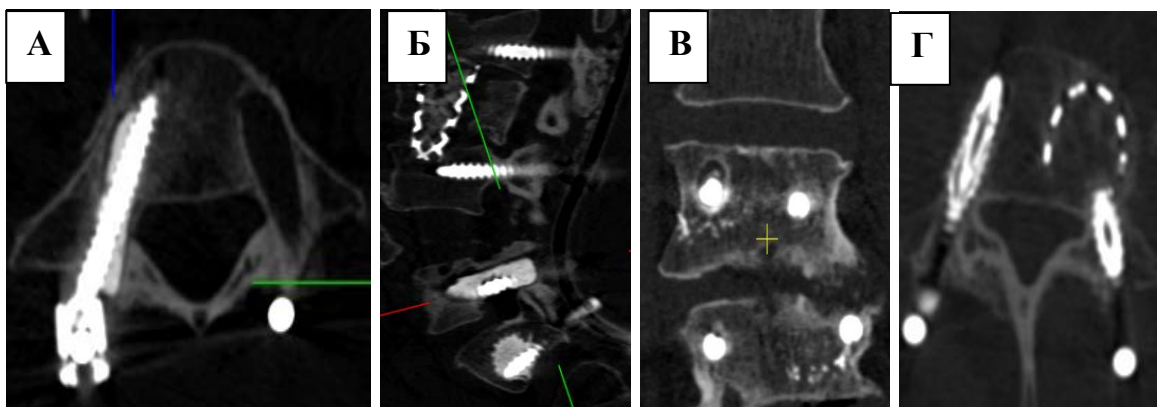


Рисунок 8.11 – Контрольные КТ контроль после ревизионного вмешательства: восстановление опороспособности ножки позвонка цементом – КТ в аксиальной проекции (А), восстановление опороспособности ножки позвонка цементом – КТ в сагиттальной проекции (Б), неэффективная аугментация ножки позвонка, КТ во фронтальной плоскости (В), применение расширяющихся винтов, КТ в аксиальной проекции (Г)

Приведенные клинические наблюдения иллюстрируют общие принципы ревизионных вмешательств – восстановление опороспособности ножек и тел позвонков, восстановление опороспособности тела позвонка, уменьшение нагрузки на фиксатор и обеспечение формирования спондилодеза. Также следует

остановиться на некоторых частных технических решениях. При расшатывании винтов на уровне S1 можно перенаправить винты без замещения дефекта, образовавшегося после расшатывания винтов. Рисунок 8.12 демонстрирует реализацию этого технического решения: рисунок 8.12 А, Б – предоперационные КТ, рисунок 8.12 В, Г – результат ревизионного вмешательства.

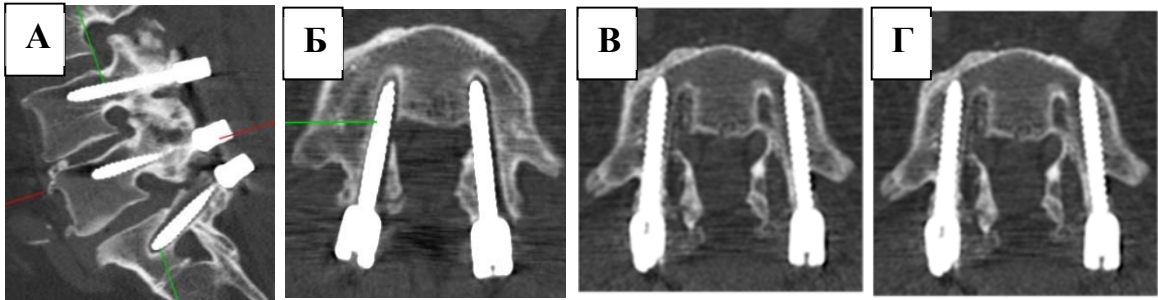


Рисунок 8.12 – Техническое решение при расшатывании винтов на уровне S1: КТ в сагиттальной плоскости до ревизии (А), КТ в аксиальной плоскости до ревизии (Б), КТ в аксиальной плоскости после ревизии (В), КТ во фронтальной плоскости после ревизии (Г)

При массивной деструкции на уровне S1, обусловленной расшатыванием винтов на фоне остеопороза, возможна установка винтов в область боковых масс с аугментацией, поскольку в данной области, как правило, очень низкая плотность. Рисунок 8.13 иллюстрирует реализацию технического решения.

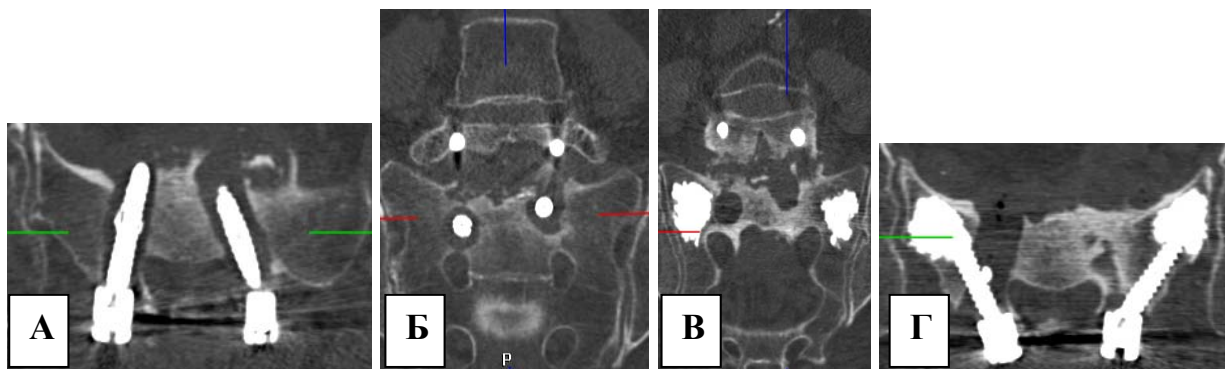


Рисунок 8.13 – Реализация технического решения при массивной деструкции на уровне S1, обусловленной расшатыванием винтов на фоне остеопороза: КТ до ревизионного вмешательства, аксиальная проекция (А), КТ до ревизионного вмешательства, фронтальная проекция (Б), КТ после ревизионного вмешательства фронтальная проекция (В), КТ после ревизионного вмешательства, аксиальная проекция (Г)

Следует отметить, что изначально пациентке выполнялась фиксация с установкой на уровне S1 расширяющихся винтов с трехкортикальной траекторией, тем не менее, это не предотвратило расшатывание винтов. В этом случае из-за значительной деструкции крестца не возникло технических трудностей при удалении расширяющихся винтов.

Для транспедикулярной фиксации у пациентов с остеопорозом позвоночника и ревизионной транспедикулярной фиксации нередко применяются расширяющиеся винты, но их использование рискованно в связи с тем, что в случае усталостного перелома винта крайне трудно будет удалить отломок, что затруднит выполнение ревизионной фиксации. Расширяющийся винт представлен на рисунке 8.14А, Б. Как правило, усталостный перелом происходит между проксимальным и расширяющимся сегментом или в области присоединения головки винта. Удалить удастся проксимальный сегмент и внутренний стержень, обеспечивающий компрессию и расширение винта, тогда как наружная расширенная часть и дистальный сегмент трудно удалить по причине врастания тканей в расширяющийся сегмент.

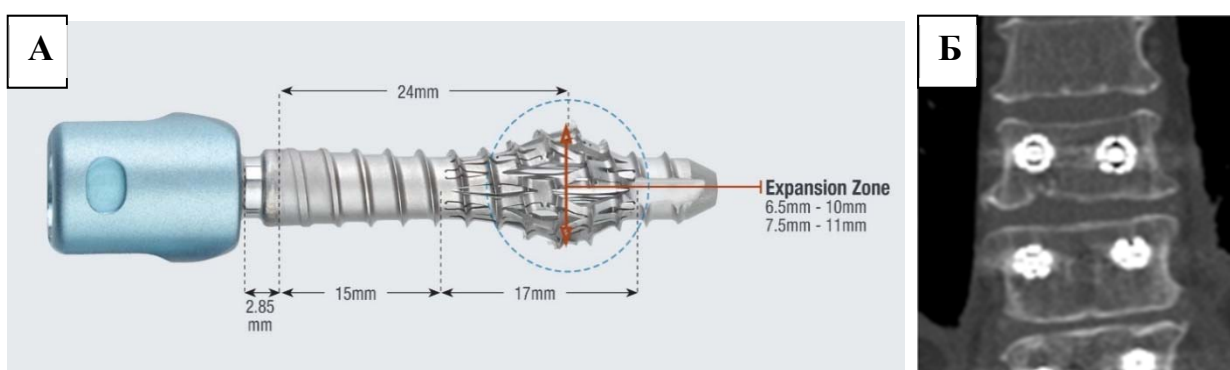


Рисунок 8.14 – Расширяющийся винт и контрольная КТ после выполненной фиксации: схема дизайна расширяющегося винта (А), КТ во фронтальной плоскости – строение винта (Б)

На рисунке 8.15 представлены технические решения при ревизионных вмешательствах по поводу усталостного перелома расширяющихся винтов.

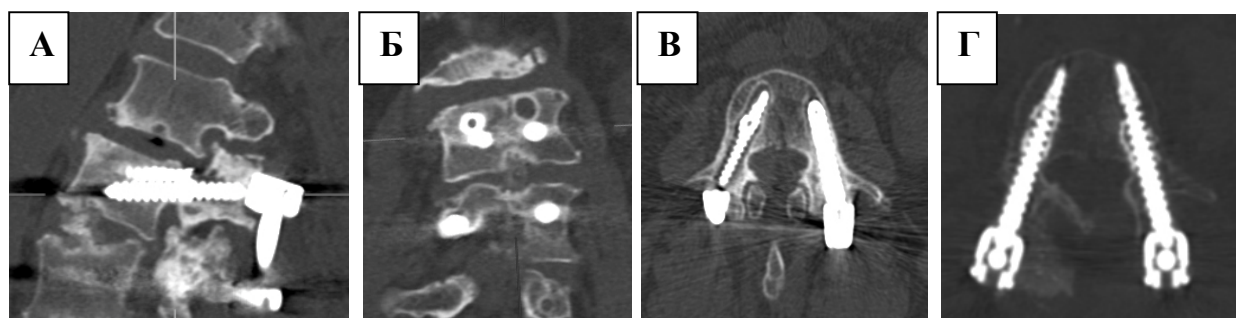


Рисунок 8.15 – Иллюстрация технических решений при ревизии транспедикулярного фиксатора с расширяющимися винтами: проведение винта без удаления отломка (А, Б), расшатывание и перелом расширяющегося винта (В), установка ревизионных винтов через расширяющийся сегмент (Г)

В ходе выполнения исследования применено два технических решения, которые позволят избежать экстенсивной остеотомии. В первом случае, когда отломок винта находится на некотором удалении от ножки позвонка, можно провести новый винт по альтернативной траектории, не удаляя фрагмент. Если нет возможности сформировать новый канал в обход фрагмента, необходимо взять конический метчик и нарезать резьбу внутри среднего расширяющегося сегмента винта, после чего провести конический винт через расширенный сегмент винта, который отрывает дистальный фрагмент расширяющегося винта и проталкивает его вперед. Иллюстрации технических решений представлены на рисунке 8.15.

Ранее обсуждалась возможность ревизии аугментированных цементом винтов, поскольку считалось, что при их удалении происходит значительная деструкция окружающей костной ткани. В условиях университетской клиники выполнено 7 ревизионных вмешательств по поводу нестабильности транспедикулярного фиксатора, как после вертебропластической техники аугментации, так и при аугментации через канюлированные винты, имплантаты удалялись без технических трудностей, не вызывая значимой деструкции окружающей костной ткани. Техническое решение ревизионного вмешательства по поводу нестабильности винтов, установленных на костный цемент, можно проиллюстрировать следующим клиническим примером.

Клиническое наблюдение 6

Пациентка С., 53 года, ранее была оперирована по поводу дегенеративного стеноза позвоночного канала на уровне L3–L4, L4–L5, L5–S1. Была выполнена декомпрессия корешков спинного мозга на указанных уровнях, трансфораминальный межтеловой спондилодез и транспедикулярная фиксация с установкой винтов на костный цемент в крайних точках фиксации. После выполненной операции регрессировала корешковая симптоматика, но через 18 месяцев отмечено увеличение интенсивности боли, которая имела ортопедический аксиальный характер с интенсивностью по ВАШ 40 баллов и индексом ограничения жизнедеятельности Освестри 62,0%. На контрольных КТ выявлено, что сформировался костный блок на уровне L4–L5 и L5–S1, а на уровне L3–L4 – псевдоартроз. Вследствие этого увеличилось плечо рычага, воздействующего на винты на уровне L3, как результат, произошел усталостный перелом винта на уровне L3 позвонка справа, а слева – произошло проксимальное расшатывание. Результаты КТ представлены на рисунке 8.16.

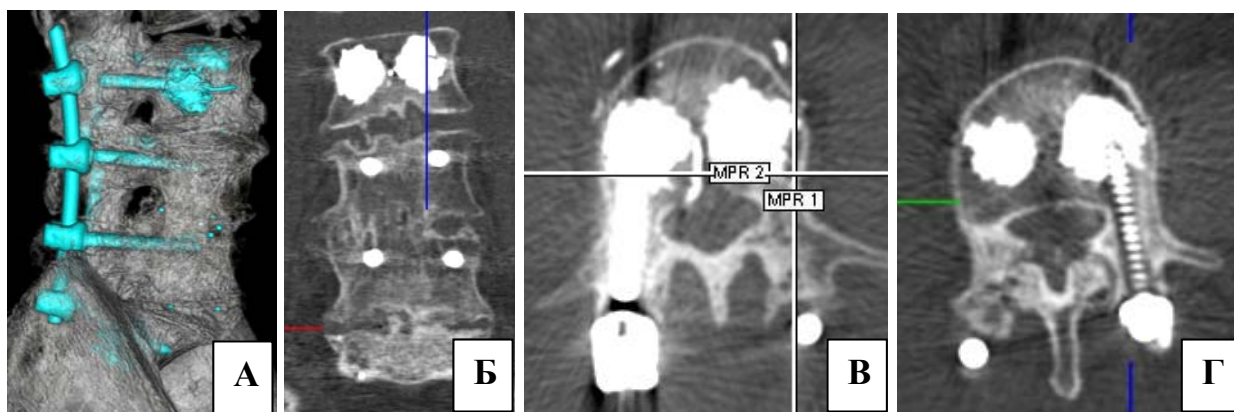


Рисунок 8.16 – Результаты КТ перед выполнением ревизионного вмешательства: КТ 3D реконструкция (А), КТ во фронтальной проекции (Б), КТ в аксиальной проекции на уровне правого винта L3 (В), КТ в аксиальной проекции на уровне левого винта L3 (Г)

Решено было выполнить ревизионное вмешательство: уменьшить рычаг, воздействующий на винты, демонтировав фиксатор на уровне L5, S1, заменить

винты на уровне L3, L4, зафиксировав только этот сегмент и выполнить задний спондилодез на уровне L3–L4.

Контрольные КТ через год после оперативного вмешательства представлены на рисунке 8.17.

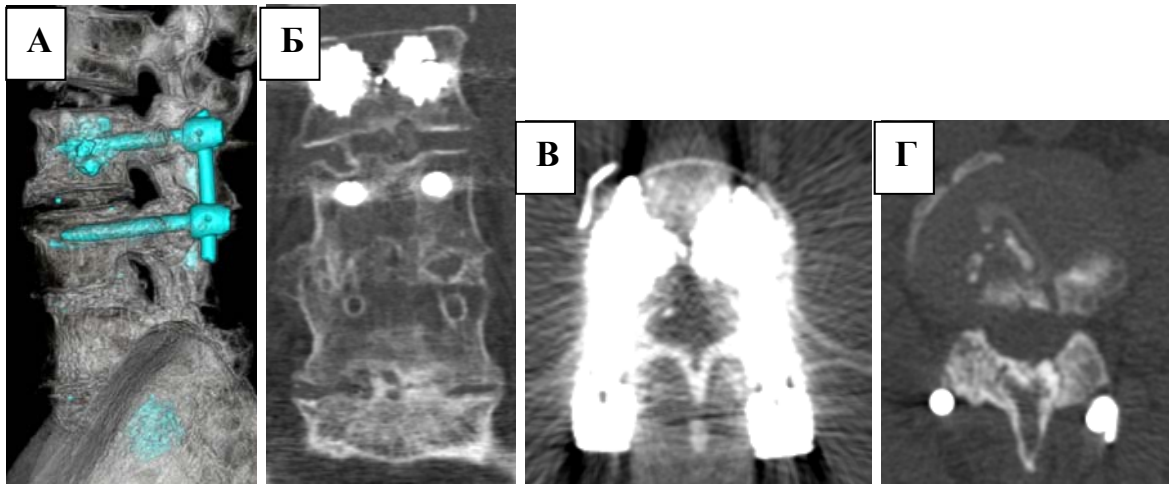


Рисунок 8.17 – Контрольные КТ через 12 месяцев после выполнения ревизионного вмешательства: КТ 3D реконструкция (А), КТ во фронтальной плоскости (Б), КТ в аксиальной проекции на уровне винтов (В), КТ в аксиальной проекции на уровне межтелового промежутка (Г)

По данным контрольных МСКТ, винты стабильны, сформировался задний костный блок на уровне L3–L4. Очевидно, что после аугментации костным цементом при необходимости винты можно удалить и заменить на ревизионные, что является преимуществом по сравнению с применением расширяющихся винтов.

Как обсуждалось ранее, аугментация винтов костным цементом не всегда решает проблему дестабилизации фискатора, и в этой группе пациентов встречается проксимальное расшатывание винтов. Это осложнение можно устранить путем импактирования костнопластического материала в область дефектов костной ткани тела и ножки позвонка, что практически идентично разработанному способу аугментации костной ткани аллокостью. Результат применения ревизионной техники представлен на рисунке 8.18.

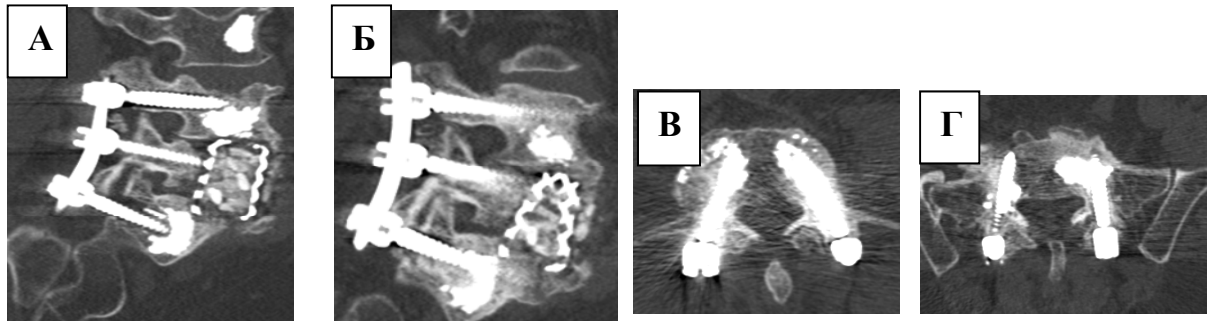


Рисунок 8.18 – Ревизионное вмешательство по поводу проксимального расшатывания винтов, аугментированных полиметилметакрилатом: КТ в проекции траектории винтов (А), КТ в проекции траектории винтов 1 год после ревизионного вмешательства (Б), КТ в аксиальной проекции на уровне L4 1 год после ревизионного вмешательства (В), КТ в аксиальной проекции на уровне S1 позвонка - 1 год после ревизионного вмешательства (Г)

На рисунке 8.18А – результаты КТ перед ревизионным вмешательством – определяется проксимальное расшатывание винтов на уровне L4, S1. Рисунок 8.18 Б, В, Г – результаты КТ после ревизионного вмешательства – признаков рентгенпрозрачной зоны вокруг винтов не выявлено.

Отдельно следует рассмотреть технические решения, если необходимо выполнить ревизионное вмешательство у пациента с повреждением ТМО при наличии псевдоменингоцеле. В этом случае целесообразно выполнить вмешательства из доступов, не сообщающихся с местом расположения псевдоменингоцеле – передний спондилодез из вентрального доступа, дополнив его односторонней транспедикулярной фиксацией с противоположной псевдоменингоцеле стороне. Рисунок 8.19 иллюстрирует предлагаемую технику операции.

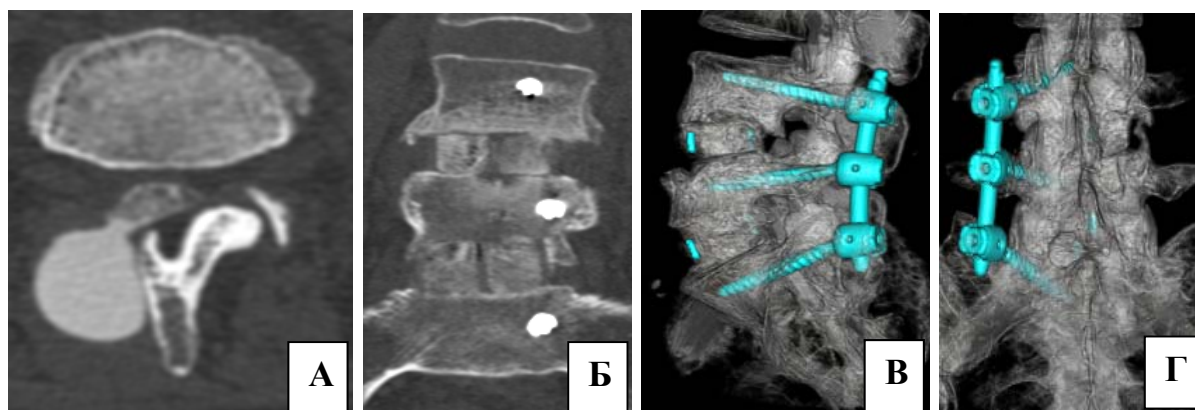


Рисунок 8.19 – Техническое решение при ликворее и псевдоменингоцеле: результаты КТ-МГ до ревизионного вмешательства (А), КТ после ревизионного вмешательства во фронтальной плоскости (Б), КТ 3D реконструкция после ревизионного вмешательства (В), КТ 3D реконструкция после ревизионного вмешательства (Г)

У данного пациента после выполнения ревизионного вмешательства был рецидив псевдоменингоцеле, но односторонняя транспедикулярная фиксация позволила повторно выполнить герметизацию ТМО без сообщения с местом установки фиксатора, таким образом был минимизирован риск инфицирования фиксатора.

К симптоматичному псевдоартрозу после вентрального спондилодеза может быть осуществлен разный подход, причем четко необходимо определиться с целью оперативного вмешательства. Если не требуется восстановление высоты межпозвонкового промежутка для устранения фораминального стеноза позвоночного канала, то можно значительно уменьшить инвазивность вмешательства. Установка дополнительного ауотрансплантата из переднего доступа в дополнение к ранее установленному кейджу без его удаления может обеспечить формирование достаточного костного блока. Рисунок 8.20 иллюстрирует применение такой техники. Преимуществом данного решения является то, что не требуется экстенсивная экспозиция диска, следовательно, и значительная диссекция магистральных сосудов.

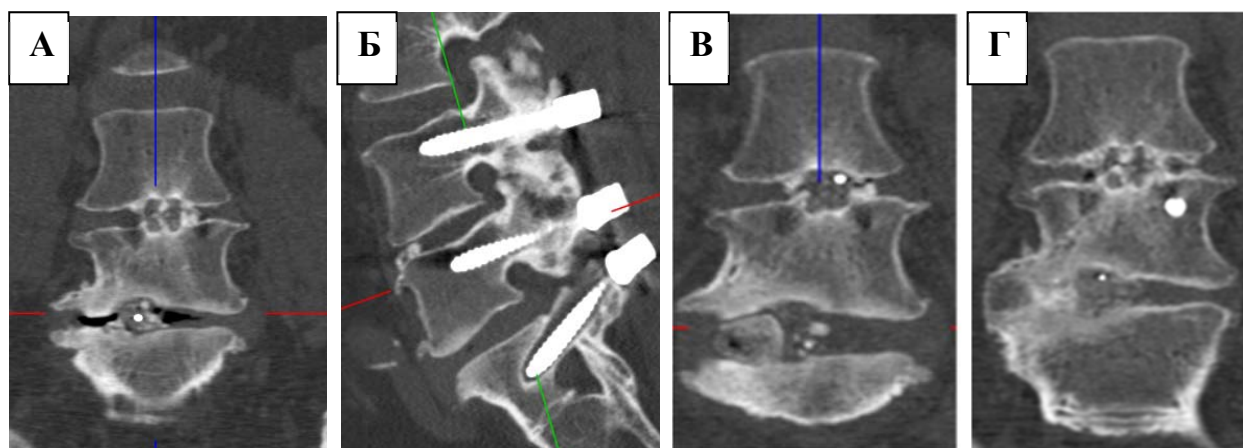


Рисунок 8.20 – Способ ревизионного вмешательства по поводу псевдоартроза после межтелового спондилодеза: предоперационная КТ во фронтальной плоскости (А), предоперационная КТ в проекции винтов (Б), послеоперационный контроль (В), послеоперационный контроль через 12 месяцев после ревизионного вмешательства (Г)

На рисунке 8.20А – представлены результаты предоперационной КТ, определяется псевдоартроз на уровне L5–S1 (вакуум феномен, рентгенпрозрачные зоны между замыкательными пластинами и костью, находящейся в кейдже). Рисунок 8.20Б – на КТ реконструкции, проходящей через ножки позвонков, не определяется фораминального стеноза. Рисунок 8.20В – в ходе ревизионного вмешательства в межпозвонковый промежуток установлен дополнительный трансплантат из аутокости. Рисунок 8.20Г – через 12 месяцев сформировался полный костный блок. Альтернативой является удаление кейджа из вентрального доступа, мобилизация межпозвонкового промежутка и передний спондилодез ALIF. При такой ревизии за счет восстановления межпозвонкового промежутка может быть устранен фораминальный стеноз, в этом случае нет необходимости вмешиваться на рубцово-измененных тканях из дорзального доступа.

Если ранее применялся вентральный доступ, то ревизия с повторным выполнением забрюшинного доступа должна быть обоснованной: диссекция структур забрюшинного пространства на фоне имеющихся рубцов имеет повышенный риск повреждения магистральных сосудов и мочеточника по причине затруднения дифференцировки тканей. Рисунок 8.21 демонстрирует наблюдение,

когда неизбежно вмешательство из вентрального доступа. У данного пациента коррекция деформации, образовавшейся после дестабилизации имплантатов возможна только после укорочения межтелового сетчатого имплантата.

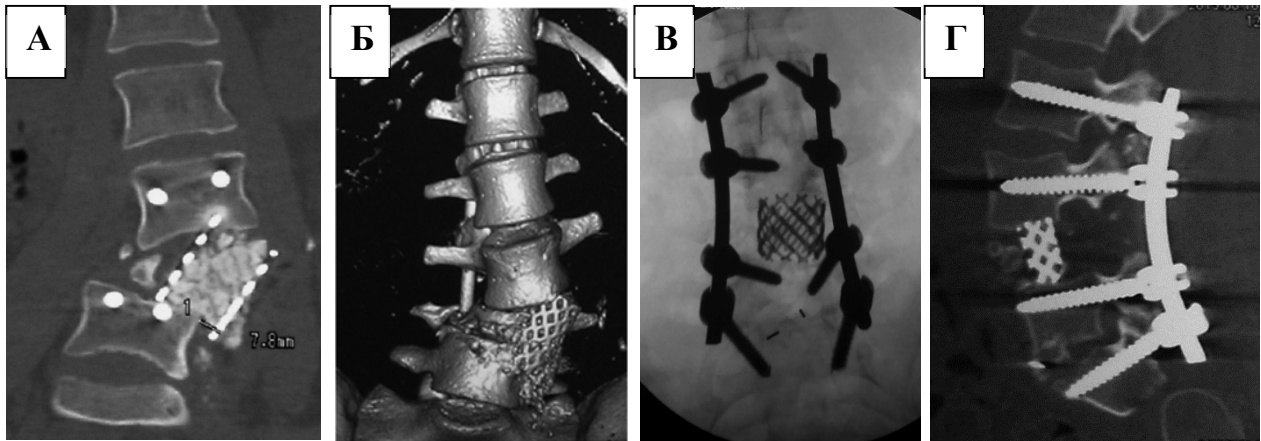


Рисунок 8.21 – Нестабильность имплантатов с развившейся деформацией: КТ перед ревизионным вмешательством (А), 3D КТ реконструкция перед ревизией (Б), послеоперационная рентгенография во фронтальной проекции (В), КТ контроль после ревизии (Г)

В данном случае первым этапом удален межтеловой имплантат, вторым этапом выполнена коррекция деформации, транспедикулярная фиксация, третьим этапом – выполнен повторный передний спондилодез укороченным сетчатым имплантатом с аутокостью. Если опороспособность вентрального имплантата сохранена, но есть симптоматический спондилоартроз, целесообразно обеспечить задний костный блок, формирование которого не зависит от состояния костной ткани тел позвонков и может сформироваться быстрее.

Дополнительно следует рассмотреть применение бикортикальной установки транспедикулярных винтов. Доказано, что эта методика увеличивает резистентность винтов к вырыванию, но применение этого метода не решает полностью проблему расшатывания имплантатов. Если происходит расшатывание винтов, то очень сложно применять методики, основанные на аугментации, так как любой костнопластический материал будет вытесняться в забрюшинное пространство.

Рисунок 8.22 иллюстрирует данные особенности бикортикальной установки винтов.

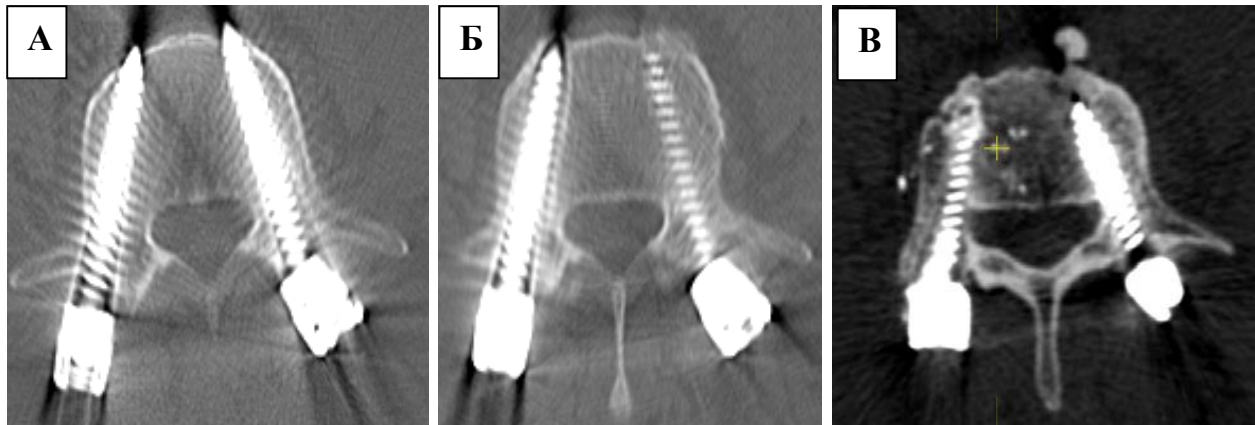


Рисунок 8.22 – Результат бикортикальной установки винтов: послеоперационный МСКТ контроль после бикортикальной установки транспедикулярных винтов (А), СМКТ контроль через 6 месяцев – нестабильность винта справа (Б), ревизионное вмешательство – костнопластический материал вытеснен в забрюшинное пространство (В)

По результатам биомеханических тестов этот метод увеличения стабильности фиксации уступает аугментации полиметилметакрилатом. Недостатком может быть также трудность восстановления опороспособности винтов, особенно если сформировался дефект костной ткани вокруг винта более 2 мм.

Безусловно, технические решения для выполнения ревизионных вмешательств часто технически более сложные, и необходимо применять все меры для того, чтобы предотвратить осложнения. Одной из причин дестабилизации имплантатов является сфокусированность только на нейрохирургической стороне оперативных вмешательств на позвоночнике, результатом которой чаще всего является необоснованная экстенсивная декомпрессия. Пренебрежение ортопедическими принципами не только приведет к неудовлетворительному результату при выполнении первичного вмешательства, но и сведет все последующие попытки ревизии к серии неудач. Анализ результатов ревизионных вмешательств позволяет сделать выводы, что при данных вмешательствах

необходимо применять сразу несколько опций: восстановление стабильности фиксатора, восстановление опороспособности костной ткани, оптимальное распределение нагрузки на имплантаты и обеспечение формирования костного блока, иначе ревизионное вмешательство закончится неудачей, и каждый следующий раз выполнять его будет сложнее. Если уже однократно развилось осложнение в виде нестабильности имплантатов, то оно может повториться, и, по возможности, следует избегать решений, которые затруднят повторные ревизионные вмешательства.

8.2 Обсуждение результатов

Транспедикулярная фиксация сегментов позвоночного столба часто используется для лечения дегенеративных заболеваний и травматических повреждений позвоночника. Несмотря на современное развитие технологий, дестабилизация фиксатора за счет расшатывания винтов или поломки компонентов системы остается существенной. Дестабилизация имплантатов может быть обусловлена не только нарушением плотности костной ткани, но и неоптимальной хирургической тактикой при первичном вмешательстве. В этом случае принципы ревизионного вмешательства не отличаются от изложенных в предыдущих главах. При ревизии должно применяться максимальное количество решений, увеличивающих стабильность инструментации (применение промежуточной фиксации у пациентов с травматическими повреждениями, уменьшение протяженности фиксации, передняя реконструкция и передний спондилодез).

Из всех разработанных способов ревизионных вмешательств наименьшие противоречия наблюдаются в отношении применения аугментации на основе ПММА. С другой стороны, применение этой методики может быть затруднено тем, что может быть слабая адгезия цемента в области дефекта ножки позвонка. Значительно затруднит восстановление опороспособности позвонков с применением ПММА, если раньше применялась бикортикальная установка винтов, поскольку в этом случае цемент с большой вероятностью будет дренироваться в паравертебральное пространство. Учитывая указанные недостатки, при

значительном дефекте эффективным решением может быть восстановление опороспособности тела и ножки позвонка за счет аугментации крошкой из аллокости, что продемонстрировано клиническими примерами № 2 и № 3.

Отдельно следует остановиться на применении расширяющихся винтов при ревизионных вмешательствах. Разработчики данной технологии предполагают, что расширяющийся винт может быть легко коллабирован и удален из тела позвонка, что подтвердилось тестами *ex-vivo*. В действительности, не учитывалась возможность прорастания расширяющегося сегмента тканями. Вследствие этого, при нестабильности расширяющегося винта удалить его удавалось только при значительном расшатывании. Если имелась поломка винта, то никогда не удавалось удалить его фрагменты. В этом случае ревизионное вмешательство можно выполнить только проведя винт по альтернативной траектории мимо отломка или непосредственно во фрагмент расширяющегося винта. Техника установки винтов на костный цемент имеет преимущества в отношении пригодности к ревизии в случае развития нестабильности. Как при вертебропластической технике аугментации, так и при использовании фенестрированных канюлированных винтов достаточно легко удалялись имплантаты и их фрагменты при поломке. Кроме того, была возможна установка винтов большего диаметра, что соответствует результатам ранее опубликованных исследований и проиллюстрировано клиническим примером № 4 [269, 270]. Свои особенности имеют ревизионные вмешательства на уровне люмбосакрального сегмента. В этом случае возможна переустановка винта по альтернативной траектории с отступом от области резорбции костной ткани. Это позволяет сделать большой размер ножки позвонка. Кроме того, возможна установка винта в боковую массу крестца, с предварительным выполнением ее аугментации.

Как показал опыт, не следует односторонне рассматривать ревизионные вмешательства, фокусируясь только на обеспечении стабильности винтов в костной ткани. Результаты исследований показывают, что может наступить расшатывание и поломка как расширяющихся винтов, так и установленных на цемент, что проиллюстрировано примерами. Необходимо также принимать во

внимание проблеме псевдоартроза или замедленного формирования костного блока. В этом случае длительное время сохраняется микроподвижность, которая приведет или к расшатыванию, или поломке имплантатов.

Многие авторы ранее опубликованных работ сходятся во мнении, что при псевдоартрозе преимущества имеет оперативное вмешательство из вентрального доступа – ALIF, OLIF, DLIF при дегенеративной патологии и реконструкция передней колонны при травматических повреждениях. Если первичное вмешательство применялось с выполнением задней декомпрессии, то ревизионное оперативное вмешательство с применением вентрального доступа позволяет избежать диссекции тканей в области рубца и снижает риски повреждения невральных структур. Вмешательством из вентрального доступа можно достигнуть сразу нескольких целей: обеспечить большую площадь сращения, выполнить коррекцию сагиттального баланса и применить непрямую декомпрессию, которая особенно эффективна при фораминальном стенозе [25, 174, 262, 334]. Дополнительным преимуществом вмешательства из вентрального доступа является возможность выполнения спондиллодеза с максимальной площадью опоры, это будет способствовать оптимальному перераспределению нагрузки, и, как следствие, уменьшению частоты расшатывания винтов [36, 49, 59, 118, 130, 186]. При планировании ревизионного вмешательства с применением переднего спондиллодеза необходимо четко определить цели вмешательства. Если требуется только обеспечить формирование костного блока, и нет необходимости устранять биомеханические нарушения, то можно, не удаляя ранее установленный кейдж, установить дополнительный ауто трансплантат в межпозвоночный промежуток. Это не требует широкой экспозиции вентральной поверхности позвоночного столба, следовательно, не требуется и значительная диссекция магистральных сосудов. Подобную тактику можно использовать при псевдоартрозе с резорбцией костной ткани вокруг имплантата после ранее проведенной реконструкции передней опорной колонны у пациентов с травматическим повреждением позвоночника – в этом случае возможна пластика тела позвонка ауто трансплантатами в зоне резорбции при обеспечении надлежащей стабильности

транспедикулярного инструментария. Если ранее был выполнен спондилодез из вентрального доступа, то в случае симптоматичного псевдоартроза следует рассмотреть ревизионное вмешательство с применением заднего спондилодеза, которое может быть выполнено или открытым вмешательством, или перкутанно минимально инвазивно по разработанному способу (патент RU 2645418 C1, зарегистрирован в Федеральной службе по интеллектуальной собственности Российской Федерации, опубликован: 21.02.2018 Бюл. № 6). Формирование заднего костного блока не зависит от состояния костной ткани тел позвонков и может происходить быстрее [1].

Подводя итоги, можно констатировать, что недостатком немногочисленных работ, посвященных ревизионной хирургии позвоночника, является сфокусированность только на восстановлении опороспособности транспедикулярных винтов при расшатывании, или только на проблеме псевдоартроза без синтеза накопленных знаний. Безусловно, что на ранних этапах послеоперационного периода фиксатор должен обеспечить достаточную стабильность для формирования костного блока в то время, как если не обеспечить его формирование, то дестабилизация наступит вследствие расшатывания или усталостного перелома металла. Используя определенную тактику у пациентов с нарушением плотности костной ткани следует учитывать сложность ревизионного вмешательства в случае дестабилизации инструментария и продумать резервный вариант, который поможет устранить нестабильность имплантатов даже при повторном ревизионном вмешательстве.

При планировании оперативных вмешательств по поводу дегенеративного или посттравматического стеноза позвоночного канала возможны и конфликтующие задачи: необходима эффективная декомпрессия спинного мозга и корешков, с другой стороны, избыточная декомпрессия дополнительно дестабилизирует сегменты позвоночного столба и делает невозможным формирование резервного заднего костного блока. Это может привести к серии неудачных ревизионных вмешательств по причине повторной дестабилизации транспедикулярного инструментария и межтеловых имплантатов. В каждом случае

оперативное вмешательство должно планироваться индивидуально. Если принято решение в пользу не прямой декомпрессии для достижения большей стабильности оперированных сегментов, и не достигнут полный регресс симптоматики, то оптимальный клинический эффект может быть достигнут применением разработанного способа с декомпрессией через тубусный ретрактор (патент RU 2720709 С1, зарегистрирован в Федеральной службе по интеллектуальной собственности Российской Федерации, опубликован: 12.05.2020 Бюл. № 14). Способ позволяет обеспечить точную декомпрессию корешков и спинного мозга при минимальной резекции структур задней опорной колонны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время отмечается тенденция к увеличению продолжительности жизни, что постепенно изменяет структуру патологии позвоночника за счет увеличения дегенеративной патологии. Обратной стороной современного технического прогресса является увеличение частоты высокоэнергетической травмы опорно-двигательного аппарата, в частности, повреждений позвоночника. При травматических повреждениях и дегенеративной патологии позвоночника, сопровождающихся нестабильностью позвоночно-двигательных сегментов широко применяется транспедикулярная фиксация с различными видами спондилодеза, которая является безальтернативным методом лечения данных патологических состояний.

Несмотря на доказанную эффективность методов, основанных на применении транспедикулярной фиксации, сохраняется значительная частота расшатывания имплантатов и псевдоартроза. Известно, что нарушение плотности костной ткани является наиболее частой причиной дестабилизации имплантатов, следовательно, при планировании оперативных вмешательств необходимо учитывать риск, обусловленный этим фактором. С целью диагностики нарушения плотности костной ткани был предложен скрининговый метод – двухэнергетическая абсорбциометрия. Также приобрела популярность оценка свойств костной ткани по данным КТ, основанная на оценке радиоденсивности в единицах Хаунсфилда. Эффективность этих двух методов обсуждается до настоящего времени, и опубликованы данные, свидетельствующие об ограничениях двухэнергетической абсорбциометрии, поскольку в результате получается суммация плотности гипертрофически измененных структур задней опорной колонны, тел и ножек позвонков. С другой стороны, несмотря на то, что радиоденсивность по данным КТ детерминирована плотностью кальция костной ткани, ее значения не калиброваны для диагностики остеопороза. По этой причине нет однозначного мнения о том, какой из вышеперечисленных методов

предпочтителен для оценки свойств костной ткани и оценки риска имплантат-зависимых осложнений.

С целью разрешения имеющихся противоречий выполнено поперечное исследование для оценки корреляции свойств костной ткани с радиоденсивностью в НУ. В ходе исследования выявлено, что механическая прочность костной ткани коррелирует с ее радиоденсивностью, поскольку этот параметр имеет сильную связь с частотой низкоэнергетических переломов позвонков. Более того, на основе этого параметра можно создать модель для оценки риска низкоэнергетических переломов с точностью классификации наблюдений, достигающей 85,0%. Несмотря на то, что результаты исследования свидетельствуют о корреляции механических свойств костной ткани со значением радиоденсивности по результатам КТ, модель оценки риска расшатывания имплантатов с учетом только этого фактора имеет недостаточную точность для классификации наблюдений, которая составила только 68 %. В ходе выполнения этого фрагмента исследования стало очевидным, что на частоту дестабилизации имплантатов могут оказать влияние другие факторы, включающие хирургическую технику и свойства имплантатов.

Анализ опубликованных исследований позволил констатировать факт, что до настоящего времени не разработаны стандартные рекомендации по лечению дегенеративной патологии поясничного отдела позвоночника, имеющие четкий алгоритм применения разработанных технологий. С другой стороны, предложено множество технических решений для оперативного лечения дегенеративной и травматической патологии позвоночника, но, отсутствуют рекомендации в отношении их рационального применения. До настоящего времени не установлены целевые параметры позвоночного канала, которые должны быть достигнуты в ходе декомпрессии и нет математического инструмента, позволяющего спрогнозировать результат не прямой декомпрессии. Также нет рекомендаций о рациональном применении различных видов спондилодеза и доказательств преимущества одной техники над другой. Дискутируется необходимость выполнения редукции позвонка при спондилолистезе. Для разрешения имеющихся

противоречий выполнено амбиспективное исследование на группе из 331 пациента с применением общей модели логистического регрессионного анализа. В качестве зависимой переменной изначально принята частота рентгенологических признаков расшатывания транспедикулярных винтов. Анализ данных позволил выявить дополнительные факторы, которые влияли на частоту дестабилизации имплантатов. Помимо снижения радиоденсивности, на частоту расшатывания винтов влияли биомеханические факторы такие, как длина фиксации и неполная редукция позвонка при спондилолистезе: при неполной редукции позвонка и при увеличении протяженности фиксации увеличивалась частота дестабилизации фиксатора. На частоту осложнения также влияла хирургическая техника: билатеральная фасетэктомия, выполненная даже на одном уровне, повышала риск дестабилизации имплантатов в то время, как ламинэктомия не являлась фактором риска. Также в ходе регрессионного анализа выявлено, что спондилодез с применением кейджа большей площади опоры, который применяется при DLIF и ALIF может значимо снизить частоту дестабилизации имплантатов у пациентов с радиоденсивностью костной ткани менее 140 HU. Включение в модель указанных переменных позволило повысить ее качество: точность классификации составила 79,1%, чувствительность – 61,7%, специфичность – 88,4%. С другой стороны, известно, что не все случаи с рентгенологическими признаками требуют ревизионного вмешательства. Если в качестве зависимой переменной использовать только частоту клинически значимой дестабилизации имплантатов, то статистически значимыми предикторами будут радиоденсивность костной ткани, протяженность фиксации и применение кейджей большой площади опоры. Тем не менее, для прогнозирования клинически значимой дестабилизации транспедикулярного фиксатора модель оказалась ограниченно пригодной в связи с низкой чувствительностью, которая составила 39,3% при относительно высокой специфичности, достигающей 92,0%. Очевидно, что может оказаться значимым влияние параметров самих транспедикулярных винтов, но тестирование этой гипотезы невозможно на этой же группе, поскольку для лечения одного и того же пациента могли применяться имплантаты с разными параметрами.

Для оценки влияния дизайна винта на частоту их расшатывания по данным КТ выполнено ретроспективное исследование на 175 пациентах. Для ограничения количества переменных и их коллинеарности исключены пациенты, которым выполнялось оперативное вмешательство с применением кейджей большой площади опоры (DLIF, ALIF), также исключены те случаи, в которых применялись винты с разными параметрами. При выполнении логистического регрессионного анализа также получены данные, что увеличение протяженности фиксации, снижение радиоденсивности и двухсторонняя фасетэктомия являются факторами, увеличивающими частоту расшатывания винтов по данным КТ. Помимо вышеуказанных факторов, параметры винта также значительно влияли на частоту дестабилизации. С увеличением наружного диаметра винта, уменьшением внутреннего диаметра и резьбового шага снижалась частота дестабилизации имплантатов. Влияние геометрии винта и типа резьбы на прочность фиксации неоднократно обсуждались в ранее опубликованных работах, но, по результатам выполненного исследования можно сделать вывод, что эти факторы имеют меньшее значение, чем ранее перечисленные, поскольку их вклад в регрессионную модель был статистически незначимым. Выполненное исследование отличается тем, что оценка влияния параметра винтов выполнена с помощью мультивариантной общей модели регрессионного анализа, что позволяет оценить влияние параметра винтов относительно ранее выявленных факторов таких, как радиоденсивность, степень резекции структур задней опорной колонны и протяженность фиксации. В итоге, результаты этого фрагмента исследования позволяют сделать заключение, что оптимальное планирование с правильным выбором техники декомпрессии и спондилодеза, выбор имплантатов с оптимальными свойствами может значительно снизить частоту дестабилизации фиксатора без применения технологий аугментации костной ткани. В ходе выполнения работы была предложена модель имплантата – педикулярного винта.

Фрагмент работы с оценкой факторов, влияющих на дестабилизацию имплантатов у пациентов с дегенеративной патологией поясничного отдела позвоночника продемонстрировал, что у пациентов с нарушением плотности

костной ткани желательна сохранять структуры задней опорной колонны, в частности, дугоотростчатые суставы, а также оптимальным является применение кейджей большой площади опоры. По этой причине у пациентов с этим патологическим состоянием предпочтительна не прямая декомпрессия корешков за счет редукции позвонка и восстановления высоты межпозвонкового промежутка. Безусловно, что такой метод будет эффективен не во всех случаях, поэтому требовалось уточнение показаний для выполнения не прямой декомпрессии, определения факторов риска и целевых значений параметров позвоночного канала, которые необходимы для достижения результата. Ранее была доказана эффективность не прямой декомпрессии корешков при фораминальном стенозе позвоночного канала, но в отношении результативности этого метода при центральном и латеральном стенозе позвоночного канала данные остаются противоречивыми. Ранее были предприняты попытки вычислить критические размеры позвоночного канала, являющиеся критерием его стеноза, но слабой стороной таких работ является то, что практически невозможно учитывать динамический компонент дегенеративного стеноза позвоночного канала, поскольку КТ и МРТ в вертикальном положении доступны в единичных клиниках, а во время движения не доступны.

Задача оценки клинико–рентгенологических корреляций для определения показаний к не прямой декомпрессии является менее сложной, поскольку после фиксации позвоночно-двигательного сегмента исключается динамический компонент. Ранее был предложен достаточно простой способ прогнозирования результата не прямой декомпрессии: предполагается, что с большой вероятностью можно получить хороший результат, если регрессирует неврологическая симптоматика в положении лежа без осевой нагрузки. Очевидно, что в этом случае достаточно зафиксировать позвонки, формирующие позвоночно-двигательный сегмент с анатомическими соотношениями как в положении лежа, чтобы обеспечить регресс неврологической симптоматики. Слабой стороной такого теста является то, что не учитывается потенциальный эффект от редукции позвонка и восстановления высоты межпозвонкового промежутка. Для разрешения

имеющихся противоречий была выполнена оценка клинико-рентгенологических корреляций в положении лежа без осевой нагрузки на позвоночник. Выявлено, что основным параметром, коррелирующим с частотой выявления неврологической симптоматики, является площадь поперечного сечения позвоночного канала. Глубина боковых каналов была статистически незначимой переменной в связи с тем, что в исследуемой группе пациентов преобладали наблюдения с центральным стенозом позвоночного канала. В результате поиска критических значений, которые позволили бы получить дискриминантную функцию с наилучшими характеристиками с помощью ROC-кривых, получены два значения с наибольшей площадью под кривой. Значение площади $80,3 \text{ мм}^2$ позволило достигнуть максимальной точности классификации наблюдений, достигающей $86,5\%$ с оптимальным соотношением чувствительности и специфичности (чувствительность – $77,9\%$, специфичность – $97,8\%$ в то время, как значение $134,3 \text{ мм}^2$ обладало наилучшими качествами, если приоритетом ставить получение модели с максимальной чувствительностью (точность классификации наблюдений составила $79,81\%$, чувствительность – $96,7\%$, специфичность – $57,8\%$). Таким образом, очевидно, что при площади поперечного сечения позвоночного канала более $134,3 \text{ мм}^2$ не требуется прямая декомпрессия корешков спинного мозга. Тем не менее, практическая значимость полученных критических значений оставалась не ясной, поскольку необходимо было уточнить, какое из них можно считать целевым при выполнении не прямой декомпрессии. Эту задачу можно выполнить, оценив корреляцию послеоперационных значений площади поперечного сечения позвоночного канала и клинических результатов. Кроме того, необходима модель пригодная для прогнозирования значений после выполнения не прямой декомпрессии.

С целью построения модели для прогнозирования рентгенологического результата не прямой декомпрессии был выполнен мультивариантный регрессионный анализ. В модель входили такие параметры, как степень редукции позвонка (разница трансляции до и после операции), разница высоты диска до и после операции и предоперационное значение площади поперечного сечения

позвоночного канала. Зависимой переменной была площадь поперечного сечения позвоночного канала после операции. Для того, чтобы устранить проблему нормальности распределения и нелинейных эффектов группа пациентов была разделена на две подгруппы: пациенты, которым проводилась редукция позвонка и тех, кому выполнено только восстановление высоты межтелового промежутка без редукции позвонка. В итоге были получены две линейные регрессионные модели, и выявлено, что площадь поперечного сечения позвоночного канала зависела от высоты межтелового промежутка по задней границе тел позвонков и от полноты редукции позвонка при спондилолистезе. Наиболее точно площадь позвоночного канала прогнозировалась, если не выполнялась редукция позвонка, а результат достигался только за счет восстановления высоты межпозвонкового промежутка. Относительная ошибка аппроксимации модели в этом случае составила 8,0% в то время, как в подгруппе пациентов, которым выполнялась редукция позвонка, относительная ошибка аппроксимации модели составила 16,0%. Эффект, который достигался за счет редукции позвонка, превышал тот, который достигался восстановлением высоты межпозвонкового промежутка, что подтверждено результатами сравнительного анализа. В отношении влияния не прямой декомпрессии на глубину боковых каналов также получены значимые регрессионные модели ковариационного анализа (в модели были значимыми дихотомические данные), но суммарные коэффициенты корреляции регрессионной модели для глубины правого и левого бокового канала составили $r=0,7871$ и $r=0,7068$ соответственно. Это значит, что в первом случае варибельность зависимой переменной объяснена на 62,0%, в то время как во втором случае – только на 50,0%. Эти модель не пригодны для прогнозирования эффекта не прямой декомпрессии при латеральном стенозе позвоночного канала в клинической практике, с другой стороны, получено дополнительное объяснение, почему латеральный стеноз позвоночного канала является неблагоприятным фактором. Если планируется не прямая декомпрессия корешков спинного мозга при латеральном стенозе, то влияние не прямой декомпрессии на глубину боковых каналов в этом случае менее прогнозируемо, чем при центральном стенозе.

Неразрешенной задачей оставались целевые значения площади поперечного сечения позвоночного канала и глубины боковых каналов, которые должны быть достигнуты после оперативного вмешательства. В группе пациентов, включенной в исследование, у 12,5% пациентов после не прямой декомпрессии корешков был неудовлетворительный результат по шкале MacNub. С целью уточнения клинической значимости ранее выявленных пороговых значений глубины бокового канала и площади сечения позвоночного канала был выполнен ядерный дискриминантный анализ, зависимой переменной были дихотомизированные результаты лечения по шкале MacNub (0 – 1, 1 – неудовлетворительные результаты). В модели использовались как абсолютные послеоперационные значения площади позвоночного канала, так и вычисленные ранее пороговые значения этого параметра, обладающие наилучшей дискриминантной функцией в отношении наличия или отсутствия неврологической симптоматики в положении лежа без осевой нагрузки. Также в модели использованы ранее установленные значения глубины бокового канала, являющегося критерием латерального стеноза позвоночного канала по данным литературы. В результате получена регрессионная модель дискриминантной функции, в которой значимыми были только дихотомизированные переменные: площадь поперечного канала менее 80 мм^2 и глубина позвоночного канала менее 3 мм. С использованием этих переменных построена модель дискриминантного анализа с точностью классификации наблюдений 92,5% (чувствительность составила 70,0%, специфичность – 95,7%). Таким образом, результаты анализа подтверждают, что клинически значимым является пороговое значение площади позвоночного канала 80 мм^2 . Его можно считать целевым при выполнении не прямой декомпрессии корешков. Также результаты анализа подтверждают значимость ранее установленного рентгенологического критерия латерального стеноза позвоночного канала – его глубины менее 3 мм. С другой стороны, если очень важна именно стабильность, минимально инвазивное вмешательство с применением спондилодеза из вентрального доступа можно дополнить минимально инвазивной декомпрессией с

применением разработанного способа доступа к структурам различных отделов позвоночника и устройства для его осуществления.

Очевидно, что значимость факторов дестабилизации фиксатора может отличаться в группе пациентов с травматическим повреждением позвоночника, поскольку техника оперативных вмешательств по поводу этой патологии отличается. Кроме того, травматические повреждения позвоночника чаще происходят на уровне грудопоясничного перехода в то время, как наиболее вовлеченными в дегенеративный процесс являются нижние сегменты поясницы. С целью верификации факторов, влияющих на частоту дестабилизации имплантатов при травматической патологии позвоночника, было выполнено амбиспективное исследование группы из 204 пациентов, и выявлено, что при снижении радиоденсивности и увеличении протяженности фиксации увеличивалась частота дестабилизации фиксатора. Также значимым фактором риска дестабилизации фиксатора были люмбосакральная фиксация по причине анатомических и биомеханических особенностей данного сегмента и наличие резидуальной кифотической деформации более 10° . Техника декомпрессии (передняя декомпрессия или резекция структур заднего опорного комплекса) значимо влияла на частоту расшатывания винтов по данным КТ: при ламинэктомии частота осложнений увеличивалась в то время, как передняя декомпрессия не влияла на стабильность инструментации. Реконструкция передней опорной колонны значительно уменьшала частоту расшатывания винтов за счет снижения нагрузки на них, промежуточная фиксация также статистически значимо снижала частоту нестабильности фиксатора по данным КТ, причем эффект от применения указанных технических решений был сопоставимым, учитывая результаты интервальной оценки отношений шансов. Построенная модель прогнозирования частоты расшатывания винтов имела высокую специфичность – 97,2% при низкой чувствительности, достигающей только 42,3%. Наилучшими характеристиками обладала модель для прогнозирования клинически значимой дестабилизации имплантатов. Значительно снижали частоту возникновения осложнений выполнение промежуточной фиксации и реконструкции передней опорной

колонны за счет биомеханического эффекта. Экстенсивная резекция задней опорной колонны, включающая ламинэктомию и тотальную резекцию дугоотростчатых суставов, приводила к увеличению частоты осложнения в то время, как передняя декомпрессия не влияла на частоту клинически значимой дестабилизацией имплантатов. Дополнительным объяснением наблюдаемого эффекта являлось то, что даже неполный задний костный блок уменьшал частоту осложнения даже при псевдоартрозе после выполнения переднего спондилодеза 3 и 4 степени по G.H. Tan (2007). Специфичность полученной дискриминантной модели составила 93,8%, чувствительность – 63,0%, точность – 89,7%. Примечательно, что в этой модели незначимым был фактор радиоденсивности костной ткани, что можно объяснить высокой эффективностью применяющейся хирургической тактики. Учитывая значимость заднего костного блока, был предложен способ минимально инвазивной стабилизации позвоночно-двигательного сегмента на уровне поясничного отдела позвоночника, включающий минимально инвазивный артродез дугоотростчатых суставов.

В настоящее время считается, что аугментация костной ткани является наиболее эффективным способом профилактики дестабилизации имплантатов у пациентов с нарушением плотности костной ткани. Наиболее эффективной и чаще всего применяющейся считается техника, основанная на применении полиметилметакрилата. С другой стороны, до настоящего времени не разработаны критерии для эффективного применения методики и считается, что показанием для аугментации позвонков является диагностированный остеопороз, но это является экстраполяцией знаний, полученных для профилактики низкоэнергетических переломов. Рациональное применение техники аугментации необходимо, поскольку эта техника не является полностью безопасной в связи с риском дренирования ПММА в позвоночный канал с возможным развитием неврологической симптоматики, и дренированием в сосудистое русло с развитием легочной эмболии, а также в связи с опасностью развития так называемого «синдрома имплантации цемента». Необоснованное расширение показаний к аугментации костной ткани также увеличит затраты на лечение. Целью этого

фрагмента исследования была разработана нового способа аугментации костной ткани, которая была бы лишена недостатков метода, основанного на применении ПММА, а также оценка ее эффективности в сравнении с ранее разработанной техникой. В качестве альтернативы общепринятой методике аугментации винтов в ходе выполнения работы были разработаны открытый и минимально инвазивный способы стабилизации позвоночно-двигательных сегментов при нарушении плотности костной ткани, основанный на аугментации тел позвонков костной крошкой (патент на изобретение «Способ стабилизации позвоночно-двигательного сегмента минимально инвазивным транспедикулярным инструментарием у пациентов с остеопорозом позвоночника, и способ стабилизации позвоночно-двигательного сегмента минимально инвазивным транспедикулярным инструментарием у пациентов с остеопорозом позвоночника» RU 2663940 С1, зарегистрирован в Федеральной службе по интеллектуальной собственности Российской Федерации, опубликован: 13.08.2018 Бюл. № 23). В ходе выполнения исследования было выявлено, что частота дренирования ПММА в позвоночный канал коррелирует с морфологическим типом венобазиллярной системы: наличие питающих отверстий позвонка более 3 мм и магистральный тип её строения являются факторами риска дренирования в позвоночный канал, следовательно, у пациентов с такими морфологическими особенностями предпочтительно применение разработанных способов для снижения риска осложнения, связанного с дренированием цемента в позвоночный канал. В ходе выполнения исследования было выявлено, что аугментация полиметилметакрилатом снижала частоту расшатывания винтов, но не влияла общую частоту дестабилизации фиксатора, включающую поломку компонентов фиксирующей системы в то время, как разработанный способ статистически значимо снижал частоту всех видов дестабилизации транспедикулярной системы. Разработанный способ аугментации позвонков по эффективности не уступал широко применяющейся методике с применением полиметилметакрилата.

Неуклонно растущее число ежегодно выполняющихся оперативных вмешательств с применением транспедикулярной фиксации приводит к росту

ревизионных вмешательств по причине дестабилизации фиксатора. Известно, что у пациентов с остеопорозом позвоночника частота дестабилизации имплантатов может достигать 50,0%. Учитывая сохраняющуюся значительную частоту дестабилизации имплантатов, необходима разработка эффективных технических решений для выполнения ревизионных оперативных вмешательств. До настоящего времени публикации, посвященные этой проблеме фрагментарны, поскольку рассматриваются по отдельности вмешательства по поводу нестабильности фиксатора и псевдоартроза в то время, как эти осложнения взаимосвязаны. При планировании ревизионного вмешательства следует учитывать, что если развилась нестабильность имплантатов, то она может развиться повторно, следовательно, техническое решение должно предусматривать возможность выполнения повторных ревизионных вмешательств. Именно по причине трудности их выполнения нельзя считать предпочтительными бикортикальную установку винтов и применение расширяющихся винтов. В первом случае практически невозможно будет применение аугментации костной ткани, во втором случае будет очень сложно удалить винт.

Для достижения хорошего результата ревизионных вмешательств необходимо учитывать максимально возможное количество факторов, обеспечивая суммационный эффект от применяющихся технических решений. Для снижения риска расшатывания винтов необходимо снизить на них нагрузку, с этой целью необходимо уменьшить рычаг силы, действующий на винты: сократить протяженность фиксации, если это возможно, установить винты в сломанный позвонок, если ранее не применялась промежуточная фиксация при травматических повреждениях и выполнить реконструкцию передней опорной колонны. Известен способ ревизионных вмешательств с применением винта большего диаметра, но этот способ не осуществим при значительной деструкции в области ножек позвонков. В этом случае необходимо выполнять их реконструкцию, восстанавливая опороспособность при помощи полиметилметакрилата или костной крошки. Последний способ может быть

предпочтительным, поскольку адгезия костного цемента на основе ПММА к влажной поверхности ослабевает.

Дополнительным фактором, который обязательно необходимо учитывать, является эффективное формирование костного блока, которое необходимо для достижения результата в отдаленном периоде. Односторонний подход, основанный только на обеспечении опороспособности винтов, с наибольшей вероятностью и привел к трансформированию случаев нестабильности фиксатора с расшатыванием в наблюдения с поломкой компонентов транспедикулярной системы в группе пациентов, которым проводилась аугментация ПММА. У пациентов с повышенным риском развития псевдоартроза целесообразно выполнять циркумферентный спондилодез, поскольку даже частично сформированный задний костный блок при переднем псевдоартрозе может предотвратить формирование клинически значимой нестабильности винтов. В некоторых случаях для уменьшения травматичности оперативного вмешательства формирование спондилодеза можно добиться костной аутопластикой, разместив аутотрансплантат из крыла подвздошной кости рядом с ранее установленным межтеловым имплантатом. Преимуществом этого метода является то, что аутокость содержит клетки, способные секретировать факторы роста, способствуя остеоинтеграции. Кроме того, в этом случае наименее вероятно отторжение трансплантата, обусловленное иммунными реакциями организма.

В ходе выполнения исследования остался неизученным еще один фактор, который освещен в литературе – низковирулентная микрофлора, которая может быть причиной резорбции костной ткани вокруг винтов. Тем не менее, сторонникам мнения, что это является основным фактором расшатывания винтов можно противопоставить факты: низковирулентная флора выявлена в 29,1 – 42,4% наблюдений, а не во всех случаях. Авторы не делают вывод, что расшатывание винтов детерминировано низковирулентной флорой, а отмечают, что это может быть одним из значимых факторов дестабилизации и то, что в этом случае должна быть настороженность в отношении низковирулентной флоры [15, 144, 230, 284]. Также сторонникам инфекционной теории расшатывания, можно

противопоставить следующие факты: трудно представить антибактериальный эффект таких технических решений, как применение кейджей большой площади опоры, реконструкции передней опорной колонны, промежуточной фиксации, аугментации позвонков, а также высокую эффективность ревизионных вмешательств без применения рекомендуемой санификации, идентификации возбудителя и антибактериальной терапии.

Подводя итоги, можно констатировать факт, что определение радиоденсивности костной ткани по результатам КТ может использоваться для оценки риска дестабилизации фиксатора, но построение модели оценки риска только на основе свойств костной ткани невозможна, поскольку на стабильность фиксации влияют и хирургическая тактика, и параметры имплантатов, что необходимо учитывать при планировании операции. Эффективность применения технических решений особенно хорошо проиллюстрирована на примере пациентов с травматическими повреждениями поясничного отдела позвоночника и груднопоясничного перехода, поскольку в дискриминантной модели для клинически значимой дестабилизации транспедикулярного фиксатора радиоденсивность костной ткани уже была незначимым фактором, следовательно, особенности пациента были максимально учтены. Рациональная хирургическая тактика с учетом всех факторов риска может оказаться эффективной настолько, что аугментация костной ткани не потребуется. Следовательно, зная потенциальный эффект оптимальной хирургической тактики, можно пересмотреть показания к аугментации позвонков, уменьшая частоту ее применения. Если нестабильность фиксатора развилась у пациента, то необходимо применить все доступные технические решения, устраняющие факторы, способствующие дестабилизации, получая суммационный эффект для максимального снижения риска развития осложнения.

Дальнейшая научная работа в рамках проблемы разработки тактики лечения пациентов с нарушением плотности костной ткани представляется целесообразной, поскольку отмечается тенденция к увеличению количества пациентов пожилого возраста с нарушением плотности костной ткани. Необходимо выполнение

рандомизированных исследований для оценки эффективности разработанного способа стабилизации позвоночно-двигательных сегментов с применением аугментации костной крошкой. Также необходима разработка новых материалов с улучшенными характеристиками для выполнения аугментации позвонков у пациентов с нарушением плотности костной ткани.

Необходимо дальнейшее исследование свойств имплантатов в моделях *ex vivo* со стандартизированной плотностью материала, имитирующего разную плотность костной ткани для усовершенствования дизайна имплантатов с целью повышения стабильности при нарушении плотности костной ткани. Другим направлением развития данного направления может быть разработка биологически активных материалов, увеличивающих скорость формирования костного блока. В этом случае возможно обеспечение формирования костного блока до расшатывания винтов или усталостного перелома фиксирующей системы.

При разработке вышеуказанных технологий важно формирование на большой базе данных математических моделей для прогнозирования результатов оперативного лечения пациентов с нарушением плотности костной ткани с дальнейшим машинным обучением с применением нейронных сетей. Это позволит обеспечить алгоритм принятия решений при планировании оперативного лечения и регламентирует применение дорогостоящих технологий таких, как аугментация позвонков и применение биологически активных имплантатов, повышая эффективность применяющихся методов лечения и снижая финансовую нагрузку на здравоохранение.

ВЫВОДЫ

1. Радиоденсивность, по данным КТ, коррелирует с механическими свойствами костной ткани, поскольку частота низкоэнергетических переломов и расшатывания транспедикулярных винтов зависит от этого параметра. Разработанная модель на основе оценки радиоденсивности губчатой костной ткани позволяет прогнозировать риск низкоэнергетических переломов с точностью 85%. Модель оценки риска расшатывания имплантатов, основанная только на этом параметре, не обладает достаточной точностью, позволяющей применять ее в клинической практике.

2. При дегенеративной патологии поясничного отдела позвоночника увеличивается частота дестабилизации имплантатов если увеличивается протяженной фиксации, сохраняется остаточная трансляция в сагиттальной плоскости более 3 мм и при двухсторонней тотальной фасетэктомии. Частота осложнений может быть уменьшена применением межтеловых имплантатов большой площади опоры при радиоденсивности костной ткани менее 140 НУ, увеличением наружного диаметра, уменьшении внутреннего диаметра и резьбового шага транспедикулярного винта.

3. Непрямая декомпрессия с сохранением заднего опорного комплекса является предпочтительной у пациентов с нарушением плотности костной ткани. Послеоперационное значение площади поперечного сечения позвоночного канала зависит от предоперационного значения, восстановления высоты межпозвонкового промежутка в задних отделах и полноты редукции позвонка при спондилолистезе. Целевые значения при непрямо́й декомпрессии являются площадь поперечного сечения позвоночного канала более 80 мм² и глубина бокового канала более 3 мм.

4. У пациентов с посттравматическим стенозом позвоночного канала частота дестабилизации транспедикулярного фиксатора зависит от протяженности фиксации, люмбосакральной фиксации, остаточной кифотической деформации более 10° и объема резекции заднего опорного комплекса. Частоту клинически

значимой дестабилизации имплантатов снижали: реконструкция передней опорной колонны, применение промежуточной фиксации и сформированный частичный или полный задний костный блок на всех оперированных уровнях.

5. Разработанный способ аугментации с применением костной крошки приводил к снижению частоты всех видов дестабилизации имплантатов. Аугментация позвонков с применением ПММА снижала частоту расшатывания транспедикулярных винтов, не влияя на общую частоту дестабилизации фиксатора, включая поломку его компонентов. Фактором риска дренирования костного цемента на основе ПММА в позвоночный канал является наличие питающего отверстия венобазиллярной системы более 3 мм и ее магистральный тип строения.

6. При планировании повторных вмешательств необходимо учитывать пригодность планируемого технического решения в отношении выполнимости повторных ревизий. Увеличение стабильности инструментации достигается путем снижения нагрузки на винты за счет сокращения длины фиксации, и одновременного применения нескольких технических решений обеспечивающих суммационный эффект, что в итоге снижает риски повторного развития нестабильности оперированных сегментов.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Для оценки качества костной ткани можно использовать результаты определения радиоденсивности губчатой костной ткани тела позвонка по данным КТ. На результаты остеоденситометрии сильное влияние оказывают гипертрофические изменения дугоотростчатых суставов, что приводит к завышению плотности костной ткани. По причине того, что измерение радиоденсивности более точный способ, нет необходимости дублировать это исследование результатами остеоденситометрии. Создание моделей прогнозирования дестабилизации имплантатов только на основании данных о свойствах костной ткани бесперспективно по причине множества других факторов, влияющих на стабильность инструментации.

2. Необходимо тщательное планирование объема оперативных вмешательств, избегая необоснованного увеличения протяженности фиксации, поскольку в этом случае возрастает риск дестабилизации имплантатов, также следует избегать избыточной задней декомпрессии: двухсторонняя тотальная фасетэктомия, выполненная даже на одном уровне, увеличивает риск дестабилизации фиксатора.

3. При планировании оперативных вмешательств у пациентов с нарушением костной плотности следует выбирать имплантаты с оптимальными свойствами: предпочтительны винты с максимальным наружным диаметром, меньшим внутренним диаметром и с меньшим резьбовым шагом. У пациентов со снижением радиоденсивности ниже 140 НУ, предпочтительно применение межтелового спондилодеза с применением кейджей большой площади опоры.

4. Создание модели риска дестабилизации имплантатов возможно только с учетом всех факторов, влияющих на стабильность, которые включают свойства костной ткани, особенности хирургической тактики и параметры имплантатов.

5. У пациентов с нарушением плотности костной ткани предпочтительна непрямая декомпрессия корешков спинного мозга. При выполнении не прямой

декомпрессии пороговыми значениями для достижения клинически значимого результата являются площадь поперечного сечения позвоночного канала, превышающая 80 мм² и глубина боковых каналов, превышающая 3 мм. Наиболее прогнозируем результат при центральном стенозе позвоночного канала, эффект не прямой декомпрессии достигается за счет восстановления высоты межпозвонкового промежутка в задних отделах и за счет редукции позвонка при спондилолистезе. Эффект от редукции позвонка превышает значимость восстановления высоты межпозвонкового промежутка. При латеральном стенозе позвоночного канала (глубина боковых каналов менее 3 мм), результат менее прогнозируем, принимать решение о не прямой декомпрессии следует, если в положении лежа регрессирует неврологическая симптоматика.

6. При нестабильных травматических повреждениях позвоночника значительно снижают риск дестабилизации имплантатов реконструкция передней опорной колонны и промежуточная фиксация, при их одновременном использовании возможен суммационный эффект. Люмбосакральная фиксация является дополнительным фактором риска дестабилизации имплантатов. В связи с этим, по возможности следует избегать включения в фиксацию люмбосакрального сегмента. В ходе оперативного вмешательства следует устранять кифотическую деформацию позвоночника, поскольку наличие резидуального кифоза более 10° является фактором риска развития нестабильности фиксации. Протяженная фиксация, включающая дополнительные сегменты не является методом профилактики дестабилизации имплантатов, основной эффект такой тактики – коррекция посттравматической деформации. У пациентов с нарушением плотности костной ткани предпочтительна передняя декомпрессия с сохранением структур задней опорной колонны, в том числе для формирования резервного заднего костного блока. Даже частично сформированный задний костный блок на уровне оперированных сегментов может предотвратить дестабилизацию имплантатов при переднем псевдоартрозе 3 и 4 степени по Tan.

7. Разработанные способы стабилизации позвоночно-двигательных сегментов с применением аугментации костной крошкой по эффективности не

уступают методам с применением полиметилметакрилата. Последняя техника снижает частоту расшатывания винтов, но не снижает общее количество случаев дестабилизации имплантатов, включающее поломку компонентов фиксатора в то время, как разработанный способ снижает частоту всех видов дестабилизации имплантатов.

8. При магистральном типе строения венобазиллярной системы и при наличии питающих отверстий диаметром более 3 мм возрастает риск дренирования в позвоночный канал цемента на основе полиметилметакрилата, в этом случае предпочтителен разработанный способ фиксации позвоночно-двигательного сегмента позвоночника, основанный на применении костной крошки.

9. Если планируется ревизионное вмешательство по поводу нестабильности фиксатора, следует помнить, что дестабилизация может повториться, следовательно, следует избегать решений, которые затруднили бы повторное ревизионное вмешательство (бикортикальная установка и применение расширяющихся имплантатов). Для достижения результата целесообразно применить одновременно несколько технических решений для достижения суммационного эффекта. Биомеханический эффект может быть достигнут за счет реконструкции передней опорной колонны и применения промежуточной фиксации. Разработанный способ аугментации позвонков с применением костной крошки может применяться для восстановления опороспособности ножек позвонков. Обеспечение костного блока может быть достигнуто путем аутологичной костной пластики, имплантируя аутотрансплантат в межпозвонковые промежутки рядом с ранее установленными имплантатами. У пациентов с нарушением костной плотности целесообразно добиваться циркумферентного спондилодеза, поскольку дополнительный задний костный блок снижает риск развития нестабильности имплантатов.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВАШ	- визуально-аналоговая шкала боли
ВОЗ	- Всемирная Организация Здравоохранения
ИБС	- ишемическая болезнь сердца
КТ	- компьютерная томография
КТМГ	- КТ-миелография
ЛФК	- лечебная физическая культура
МКБ	- международная классификация болезней
МРТ	- магнитно-резонансная томография
ОШ	- отношение шансов
ПДС	- позвоночно-двигательного сегмента
ПММА	- полиметилметакрилат
ТМО	- твердая мозговая оболочка
ФТЛ	- физио-терапевтическое лечение
ALIF	- anterior lumbar interbody fusion
ANCOVA	- analysis of covariance
АО	- Arbeitsgemeinschaft for Osteosynthesefragen / Association for the Study of Internal Fixation
ASIA	- The American Spinal Injury Association
CI	- confidence interval
DLIF	- direct lateral interbody fusion
DXA	- dual-energy X-ray absorptiometry
FRAX	- a fracture risk assessment tool
HU	- Hounsfield Unit
LL	- lumbar lordosis
OLIF	- oblique lateral interbody fusion
PI	- pelvic incidence
PLF	- posterior lumbar interbody fusion
ROC-анализ	- receiver operating characteristic-анализ
SD	- standard deviation
SVA	- sagittal vertical axis
TLIF	- transforaminal lumbar interbody fusion

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булкин, А. А. Факторы, влияющие на формирование костного блока у пациентов с дегенеративной патологией поясничного отдела позвоночника / А. А. Булкин, А. Е. Боков, С. Г. Млявых // Российский нейрохирургический журнал им. профессора А.Л. Поленова. – 2019. – Т. 11, № 2. – С.12–16.
2. Влияние позвоночно-тазовых параметров на частоту развития нестабильности смежного сегмента при моносегментарной фиксации в поясничном отделе / С. В. Масевнин, Д. А. Пташников, И. В. Волков [и др.] // Вопросы нейрохирургии им. Н. Н. Бурденко. – 2019. – Т. 83, № 2. – С. 80–84.
3. Гуща, А. О. Опыт минимально инвазивной хирургии и современный взгляд на лечение дегенеративных поражений позвоночника / А. О. Гуща, А. Р. Юсупова // Вопросы нейрохирургии им. НН Бурденко. – 2021. – Т. 85, № 1. – С. 5–9.
4. Гуща, А. О. Современные концепции дегенерации межпозвонковых дисков / А. О. Гуща, А. Р. Юсупова // Вопросы нейрохирургии им. Н. Н. Бурденко. – 2020. – Т. 84, № 6. – С. 112–117.
5. Гуща, А. О. Современные представления и классификации стенозов позвоночного канала. Диаметр позвоночного канала в норме и патологии / А. О. Гуща, Н. А. Коновалов // Хирургия дегенеративных поражений позвоночника. – 2019. – С. 325–335.
6. Дегенеративный стеноз поясничного отдела позвоночника: характеристика минимально инвазивных микрохирургических методов лечения / Н. А. Коновалов, А. Г. Назаренко, Д. С. Асютин [и др.] // Вопросы нейрохирургии им. Н. Н. Бурденко. – 2021. – Т. 85, № 4. – С. 87–95.
7. Клинико-рентгенографические корреляции (по данным компьютерной томографии) у пациентов с дегенеративным поясничным стенозом позвоночника / С. Г. Млявых, А. Я. Алейник, А. Е. Боков [и др.] // Медицинская визуализация. – 2017. – Т. 21, № 5. – С. 124–130.

8. Легочная цементная эмболия при перкутанной вертебропластике и транспедикулярной фиксации с установкой винтов на костный цемент: возможные факторы риска / А. Е. Боков, С. Г. Млявых, А. Я. Алейник [и др.] // Хирургия позвоночника. – 2016. – Т. 13. №. 1. – С. 67–71.
9. Леонова, О. Н. Несостоятельность винтовой фиксации после спондилодеза 360° на поясничном уровне / О. Н. Леонова, Е. С. Байков, А. В. Крутько // Вестник травматологии и ортопедии им. НН Приорова. – 2020. – Т. 27, № 4. – С. 11–18.
10. Масевнин, С. В. Влияние позвоночно-тазовых параметров на развитие нестабильности смежного сегмента после одноуровневого спондилодеза в поясничном отделе позвоночника / С. В. Масевнин, Д. А. Пташников, И. В. Волков // Современные проблемы науки и образования. – 2019. – № 1. – С. 44–44.
11. Одноэтапное и многоэтапное хирургическое лечение пациентов с нарушением сагиттального баланса дегенеративной этиологии / Е. С. Байков, А. В. Пелеганчук, А. В. Крутько [и др.] // Хирургия позвоночника. – 2021. – Т. 18, № 2. – С. 44–53.
12. Оптимизация спондилосинтеза при некоторых оскольчатых повреждениях позвонков грудопоясничной локализации / С. В. Лихачев, В. Б. Арсениевич, В. В. Островский [и др.] // Современные технологии в медицине. – 2020. – Т. 12, № 4. – С. 30–39.
13. Патент № 2672933 РФ, МПК А61F 2/44, А61F 2/46. Имплантат для замещения межпозвонковых дисков и инструмент для его установки : № 2017128277 : заявл. 07.08.2017 : опубл. 21.11.2018 / Колесов С. В., Белов И. М., Иванова Е. С., Егоров К. А., Ильин М. В., Барзинский О. В., Гордеев С. К. : заявитель Барзинский Олег Викторович, Гордеев Сергей Константинович : [сайт]. – URL: https://new.fips.ru/register-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2672933&TypeFile=html (дата обращения: 19.05.2022).
14. Повреждения структур забрюшинного пространства и органов брюшной полости при операциях на поясничном отделе позвоночника / А. А. Гринь, Р. А.

Коваленко, Н. А. Коновалов [и др.] // Нейрохирургия. – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 35–42.

15. Применение вакуумных систем при ранней имплант-ассоциированной инфекции, развившейся после декомпрессивно-стабилизирующих операций при поясничном спинальном стенозе / В. К. Шаповалов, И. В. Басанкин, А. А. Афаунов [и др.] // Хирургия позвоночника. – 2021. – Т. 18, № 3. – С. 53–60.

16. Проблема несоответствий между результатами компьютерной томографии и двухэнергетической рентгеновской денситометрии / А. Е. Боков, С. Г. Млявых, А. А. Булкин [и др.] // Инновационная медицина Кубани. – 2019. – Т. 16, № 4. – С. 12–17.

17. Прогностическая значимость костной плотности, определенной при компьютерной томографии, в отношении низкоэнергетических переломов позвоночника / А. Е. Боков, С. Г. Млявых, А. Я. Алейник [и др.] // Медицинская визуализация. – 2015. – № 3. – С. 94–98.

18. Сравнение эффективности использования симультанных и этапных минимально-инвазивных дорсальных декомпрессивно-стабилизирующих вмешательств у пациентов с дегенеративными заболеваниями поясничного отдела позвоночника / В. А. Бывальцев, А. А. Калинин, Н. А. Коновалов [и др.] // Вопросы нейрохирургии им. НН Бурденко. – 2021. – Т. 85, № 1. – С. 36–46.

19. Сравнение эффективности применения стержней из нитинола и титановых стержней при хирургическом лечении дегенеративных заболеваний позвоночника с фиксацией пояснично-крестцового отдела / С. В. Колесов, А. И. Казьмин, В. В. Швец [и др.] // Травматология и ортопедия России. – 2019. – Т. 25, № 2. – С. 59–70.

20. Стабилизация позвоночника у больных с переломами грудных и поясничных позвонков при пониженной минеральной плотности костной ткани / А. А. Афаунов, И. В. Басанкин, К. К. Тахмазян [и др.] // Инновационная медицина Кубани. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 31–39.

21. Теоретические и практические аспекты применения декомпрессивно-стабилизирующих операций при дегенеративных стенозах пояснично-крестцового отдела позвоночника. Алгоритм выбора хирургического вмешательства / А. О.

Гуща, Н. А. Коновалов, А. В. Крутько [и др.] // Хирургия дегенеративных поражений позвоночника. – 2019. – С. 358–380.

22. Техника перкутанного артродеза дугоотростчатых суставов в хирургическом лечении дегенеративных заболеваний поясничного отдела позвоночника / А. А. Булкин, А. Е. Боков, С. Г. Млявых [и др.] // Нейрохирургия. – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 29–36.

23. Факторы, влияющие на стабильность транспедикулярной фиксации у пациентов с нестабильными повреждениями поясничного отдела позвоночника и переходной грудопоясничной области / А. Е. Боков, С. Г. Млявых, И. С. Братцев [и др.] // Инновационная медицина Кубани. – 2020. – Т. 19, № 3. – С. 12–19.

24. Философия некоторых проблем спинальной нейрохирургии / А. С. Елисеев, А. Е. Боков, С. Г. Млявых [и др.] // Вопросы нейрохирургии им. Н. Н. Бурденко. – 2021. – Т. 85, № 1. – С. 28–35.

25. Хирургическая коррекция сагиттального дисбаланса поясничного отдела позвоночника дегенеративного генеза / Е. С. Байков, А. В. Пелеганчук, А. В. Крутько [и др.] // Хирургия позвоночника. – 2020. – Т. 17, № 2. – С. 49–57.

26. Хирургическое лечение пациентов с сагиттальным дисбалансом дегенеративной этиологии: сравнение двух методик / Е. С. Байков, А. В. Пелеганчук, А. В. Крутько [и др.] // Вестник травматологии и ортопедии им. Н. Н. Приорова. – 2020. – Т. 27, № 3. – С. 16–26.

27. A comparative study on screw loosening in osteoporotic lumbar spine fusion between expandable and conventional pedicle screws / Z. Wu, F. Gong, L. Liu [et al.] // Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery. – 2012. – Vol. 132, № 4. – P.471–476.

28. A metaanalysis of trabecular bone score in fracture risk prediction and its relationship to FRAX / E. V. McCloskey, A. Odén, N. C. Harvey [et al.] // Journal of Bone Mineral Research. – 2016. – Vol. 31, № 5. – P. 940–948.

29. A radiographic assessment of the ability of the extreme lateral interbody fusion procedure to indirectly decompress the neural elements / L. Oliveira, L. Marchi, E. Coutinho [et al.] // Spine. – 2010. – Vol. 35, № 26S. – P. S331–S337.

30. A reference standard for the description of osteoporosis / J. A. Kanis, E. V. McCloskey, H. Johansson [et al.] // *Bone*. – 2008. – Vol. 42, № 3. – P. 467–475.
31. A simplified treatment algorithm for treating thoracic and lumbar spine trauma / A. F. Joaquim, A. A. Patel, G. D. Schroeder [et al.] // *The Journal of Spinal Cord Medicine*. – 2019. – Vol. 42, № 4. – P. 416–422.
32. Adjustment of Suboptimally Placed Lumbar Pedicle Screws Decreases Pullout Strength and Alters Biomechanics of the Construct: A Pilot Cadaveric Study / R. K. Wadhwa, J. D. Thakur, I. S. Khan [et al.] // *World Neurosurgery*. – 2015. – Vol. 83, № 3. – P. 368–375.
33. Aly, T. A. Short Segment versus Long Segment Pedicle Screws Fixation in Management of Thoracolumbar Burst Fractures: Meta-Analysis / T. A. Aly // *Asian Spine Journal*. – 2017. – Vol. 11, № 1. – P. 150–160.
34. An analysis of reasons for failed back surgery syndrome and partial results after different types of surgical lumbar nerve root decompression / A. Bokov, A. Isrelov, A. Skorodumov [et al.] // *Pain physician*. – 2011. – Vol. 14, № 6. – P. 545–557.
35. An Association Can Be Found Between Hounsfield Units and Success of Lumbar Spine Fusion / J. J. Schreiber, A. P. Hughes, F. Taher [et al.] // *HSS Journal*. – 2014. – Vol. 10, № 1. – P. 25–29.
36. Analysis of Stress Distribution in Lumbar Interbody Fusion / N. Kumar, M. R. Judith, A. Kumar [et al.] // *Spine*. – 2005. – Vol. 30, № 15. – P. 1731–1735.
37. Analysis of the Risk Factors for Unfavorable Radiologic Outcomes after Fusion Surgery in Thoracolumbar Burst Fracture: What Amount of Postoperative Thoracolumbar Kyphosis Correction is Reasonable? / D. K. Seo, C. H. Kim, S. K. Jung [et al.] // *Journal of Korean Neurosurgical Society*. – 2019. – Vol. 62, № 1. – P. 96–105.
38. Anterior lumbar interbody fusion may provide superior decompression of the foraminal space compared with direct foraminotomy: biomechanical cadaveric study / K. Odeh, A. Rosinski, J. Nguyen [et al.] // *World Neurosurgery*. – 2020. – Vol. 135. – P. e71–e76.

39. Anterior versus posterior approach for treatment of thoracolumbar burst fractures: a meta-analysis / G. J. Xu, Z. J. Li, J. X. Ma [et al.] // *European Spine Journal*. – 2013. – Vol. 22, № 10. – P. 2176–2183.
40. Anterior versus posterior approach in traumatic thoracolumbar burst fractures deemed for surgical management: Systematic review and meta-analysis / T. Tan, J. Rutges, T. Marion [et al.] // *Journal of Clinical Neuroscience*. – 2019. – Vol. 70. – P. 189–197.
41. Aortic calcification contributing to bone densitometry measurement / J. A. Smith, J. A. Vento, R. P. Spencer [et al.] // *Journal of Clinical Densitometry*. – 1999. – Vol. 2, № 2. – P. 181–183.
42. Application of quantitative computed tomography for assessment of trabecular bone mineral density, microarchitecture and mechanical property / S. S. Mao, D. Li, Y. Luo [et al.] // *Clinical Imaging*. – 2016. – Vol. 40, № 2. – P. 330–338.
43. Arbeitsgruppe Osteoporotische Frakturen der Sektion Wirbelsaule der Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie. [Hounsfield units as a measure of bone density-applications in spine surgery] / M. J. Scheyerer, B. Ullrich, G. Osterhoff [et al.] // *Unfallchirurg*. – 2019. – Vol. 122, № 8. – P. 654–661.
44. Assessment of different screw augmentation techniques and screw designs in osteoporotic spines / S. Becker, A. Chavanne, R. Spitaler [et al.] // *European Spine Journal*. – 2008. – Vol. 17, № 11. – P.1462–1469.
45. Augmented pedicle trajectory applied on the osteoporotic spine with lumbar degenerative disease: mid-term outcome / G. Mo, H. Guo, D. Guo [et al.] // *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*. – 2019. – Vol. 14, № 1. – P. 170.
46. Average Lumbar Hounsfield Units Predicts Osteoporosis-Related Complications Following Lumbar Spine Fusion / J. D. St. Jeor, T. J. Jackson, A. E. Xiong [et al.] // *Global Spine Journal*. – 2020. – P. 2192568220975365.
47. Bederman, S. S. An Approach to Lumbar Revision Spine Surgery in Adults / S. S. Bederman, V. H. Le, S. Pahlavan // *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*. – 2016. – Vol. 24, № 7. – P. 433–442.

48. Binder, D. K. Lumbar spinal stenosis / D. K. Binder, M. H. Schmidt, P. R. Weinstein // *Seminars in neurology*. – 2002. – Vol. 22, № 02. – P. 157–166.
49. Biomechanical Analysis and Review of Lateral Lumbar Fusion Constructs / A. Cappuccino, G. B. Cornwall, A. W. L. Turner [et al.] // *Spine*. – 2010. – Vol. 35, № 26S. – P. S361–S367.
50. Biomechanical analysis of four-versus six-screw constructs for short-segment pedicle screw and rod instrumentation of unstable thoracolumbar fractures / R. P. Norton, E. L. Milne, D. N. Kaimrajh [et al.] // *The Spine Journal*. – 2014. – Vol. 14, № 8. – P. 1734–1739.
51. Biomechanical Analysis of Pedicle Screw Fixation for Thoracolumbar Burst Fractures / M. McDonnell, K. N. Shah, D. J. Paller [et al.] // *Orthopedics*. – 2016. – Vol. 39, № 3. – P. e514–e518.
52. Biomechanical analysis of pedicle screw thread differential design in an osteoporotic cadaver model / H. Mehta, E. Santos, C. Ledonio [et al.] // *Clinical Biomechanics*. – 2012. – Vol. 27, № 3. – P. 234–240.
53. Biomechanical analysis of three surgical approaches for lumbar burst fractures using short-segment instrumentation / M. Dobran, D. Nasi, D. Brunozzi [et al.] // *Spine*. – 1993. – Vol. 18, № 8. – P. 977–982.
54. Biomechanical Comparison of 4 Fixation Techniques of Sacral Pedicle Screw in Osteoporotic Condition / B.-S. Yu, X.-M. Zhuang, Z.-M. Zheng [et al.] // *Spinal Disorders & Techniques*. – 2010. – Vol. 23, № 6. – P. 404–409.
55. Biomechanical Comparison of Anterior Lumbar Interbody Fusion and Transforaminal Lumbar Interbody Fusion / A. Ploumis, C. Wu, G. Fischer [et al.] // *Journal of Spinal Disorders & Techniques*. – 2008. – Vol. 21, № 2. – P. 120–125.
56. Biomechanical comparison of pedicle screw augmented with different volumes of polymethylmethacrylate in osteoporotic and severely osteoporotic cadaveric lumbar vertebrae: an experimental study / D. Liu, B. Zhang, Q. Xie [et al.] // *The Spine Journal*. – 2016. – Vol. 16, № 9. – P. 1124–1132.

57. Biomechanical comparison of pedicle screw fixation strength in synthetic bones: Effects of screw shape, core/thread profile and cement augmentation / M. Y. Liu, T. T. Tsai, P. L. Lai [et al.] // PLoS ONE. – 2020. – Vol. 15, № 2. – P. e0229328.
58. Biomechanical comparison of short-segment posterior fixation including the fractured level and circumferential fixation for unstable burst fractures of the lumbar spine in a calf spine model / A. Sait, N. R. Prabhav, V. Sekharappa [et al.] // Journal of Neurosurgery: Spine SPI. – 2016. – Vol. 25, № 5. – P. 602–609.
59. Biomechanical differences of Coflex-F and pedicle screw fixation combined with TLIF or ALIF—a finite element study / C. C. Lo, K. J. Tsai, Z. C. Zhong [et al.] // Computer methods in biomechanics and biomedical engineering. – 2011. – Vol. 14, № 11. – P. 947–956.
60. Biomechanical Evaluation of a Novel Fenestrated Pedicle Screw Augmented With Bone Cement in Osteoporotic Spines / P. E. Paré, J. L. Chappuis, R. Rampersaud [et al.] // Spine. – 2011. – Vol. 36, № 18. – P.E1210–E1214.
61. Biomechanical evaluation of interbody fixation with secondary augmentation: lateral lumbar interbody fusion versus posterior lumbar interbody fusion / J. Godzik, S. Kalb, M. T. Reis [et al.] // Journal of Spine Surgery. – 2018. – Vol. 4, № 2. – P. 180–186.
62. Biomechanical Evaluation of the Pedicle Screw Insertion Depth Effect on Screw Stability Under Cyclic Loading and Subsequent Pullout / K. J. Karami, L. E. Buckenmeyer, A. M. Kiapour [et al.] // Journal of Spinal Disorders and Techniques. – 2015. – Vol. 28, № 3. – P. E133–E139.
63. Biomechanical Investigation of a Novel Revision Device in an Osteoporotic Model / J. Manon, M. M. Hussain, J. Harris [et al.] // Clinical spine surgery. – 2017. – Vol. 30, № 6. – P. 265–271.
64. Biomechanical properties of pedicle screw fixation augmented with allograft bone particles in osteoporotic vertebrae: different sizes and amounts / C. Jia, R. Zhang, T. Xing [et al.] // The Spine Journal. – 2019. – Vol. 19, № 8. – P. 1443–1452.
65. Biomechanical study of injectable hollow pedicle screws for PMMA augmentation in severely osteoporotic lumbar vertebrae: effect of PMMA distribution and volume on

- screw stability / D. Liu, J. Sheng, H. Wu [et al.] // *Journal of Neurosurgery: Spine*. – 2018. – Vol. 29, № 6. – P.639–646.
66. Biomechanical study of rotational micromovement of the pedicle screw / T. Mizuno, Y. Kasai, T. Sakakibara [et al.] // *Springerplus*. – 2016. – Vol. 5, № 1. – P. 1–4.
67. Biomechanical study of the fixation stability of broken pedicle screws and subsequent strategies / M. K. Hsieh, M. Y. Liu, J. K. Chen [et al.] // *PLOS ONE*. – 2019. – Vol. 14, № 6. – P. e0219189.
68. Biomechanics of thoracic short versus long fixation after 3-column injury / B. C. R. Lazaro, F. E. Deniz, L. B. C. Brasiliense [et al.] // *Journal of Neurosurgery: Spine*. – 2011. – Vol. 14, № 2. – P. 226–234.
69. Boateng, E.Y. A Review of the Logistic Regression Model with Emphasis on Medical Research / E. Y. Boateng, D. A. Abaye // *Journal of Data Analysis and Information Processing*. – 2019. – Vol. 07, № 04. – P. 190–207.
70. Bone cement implantation syndrome / A. J. Donaldson, H. E. Thomson, N. J. Harper [et al.] // *British Journal of Anaesthesia*. – 2009. – Vol. 102, № 1. – P. 12–22.
71. Bone Mineral Density and Trabecular Bone Score in Predicting Vertebral Fractures in Male Employees of the Electricity Generating Authority of Thailand / C. Sakulpisuti, C. Sritara, A. Kositwattanarek [et al.]. – DOI 10.1155/2022/6832166 // *Journal of Osteoporosis*. – 2022. – Vol. 2022. – URL: <https://downloads.hindawi.com/journals/jos/2022/6832166.pdf>. – Дата публикации: 29.03.2022.
72. Bone Mineral Density Values Derived from Routine Lumbar Spine Multidetector Row CT Predict Osteoporotic Vertebral Fractures and Screw Loosening / B. J. Schwaiger, A. S. Gersing, T. Baum [et al.] // *American Journal of Neuroradiology*. – 2014. – Vol. 35, № 8. – P. 1628–1633.
73. Byvaltsev, V. A., Kalinin A. A., Konovalov N. A. Minimally invasive spinal surgery: stages of development / V. A. Byvaltsev, A. A. Kalinin, N. A. Konovalov // *Zhurnal voprosy neirokhirurgii imeni N. N. Burdenko*. – 2019. – Т. 83, № 5. – С. 92–100.

74. Can Insertional Torque Predict Screw Loosening and Related Failures? / K. Okuyama, E. Abe, T. Suzuki [et al.] // *Spine*. – 2000. – Vol. 25, № 7. – P. 858–864.
75. Case finding for the management of osteoporosis with FRAX®—assessment and intervention thresholds for the UK / J. A. Kanis, E. V. McCloskey, H. Johansson [et al.] // *Osteoporosis International*. – 2008. – Vol. 19, № 10. – P. 1395–1408.
76. Cement leakage causes potential thermal injury in vertebroplasty / P. L. Lai, C. L. Tai, L. H. Chen [et al.] // *BMC musculoskeletal disorders*. – 2011. – Vol. 12, № 1. – P. 1–6.
77. Cement leakage in pedicle screw augmentation: a prospective analysis of 98 patients and 474 augmented pedicle screws / J. U. Mueller, J. Baldauf, S. Marx [et al.] // *Journal of Neurosurgery: Spine*. – 2016. – Vol. 25, № 1. – P. 103–109.
78. Chad, D. A. Lumbar spinal stenosis / D. A. Chad // *Neurologic clinics*. – 2007. – Vol. 25, № 2. – P. 407–418.
79. Changes in cross-sectional measurements of the spinal canal and intervertebral foramina as a function of body position: in vivo studies on an open-configuration MR system / M. R. Schmid, G. Stucki, S. Duetwell [et al.] // *AJR. American journal of roentgenology*. – 1999. – Vol. 172, № 4. – P. 1095–1102.
80. Characteristics of pullout failure in conical and cylindrical pedicle screws after full insertion and back-out / B. B. Abshire, R. F. McLain, A. Valdevit [et al.] // *The Spine Journal*. – 2001. – Vol. 1, № 6. – P. 408–414.
81. Cho, W. The biomechanics of pedicle screw-based instrumentation / W. Cho, S. K. Cho, C. Wu // *The Journal of bone and joint surgery. British volume*. – 2010. – Vol. 92, № 8. – P. 1061–1065.
82. Chun, D. S. Lumbar pseudarthrosis: a review of current diagnosis and treatment / D. S. Chun, K. C. Baker, W. K. Hsu // *Neurosurgical Focus*. – 2015. – Vol. 39, № 4. – P. E10.
83. Classification of Osteoporotic Thoracolumbar Spine Fractures: Recommendations of the Spine Section of the German Society for Orthopaedics and Trauma (DGOU) / K. J. Schnake, T. R. Blattert, P. Hahn [et al.] // *Global Spine Journal*. – 2018. – Vol. 8, № 2_suppl. – P. 46S–49S.

84. Clinical and Radiographic Comparisons among Minimally Invasive Lumbar Interbody Fusion: A Comparison with Three-Way Matching / W. Yingsakmongkol, K. Jitpakdee, P. Varakornpipat [et al.]. – DOI 10.31616/asj.2021.0264 // Asian spine journal. – URL: <https://www.asianspinejournal.org/upload/pdf/asj-2021-0264.pdf>. – Дата публикации: 24.08.2021.
85. Clinical and radiological outcomes of a new cage for direct lateral lumbar interbody fusion / S. J. Kim, Y. S. Lee, Y. B. Kim [et al.] // Korean Journal of Spine. – 2014. – Vol. 11, № 3. – P. 145.
86. Clinical considerations for spinal surgery in the osteoporotic patient: A comprehensive review / S. McCoy, F. Tundo, S. Chidambaram [et al.] // Clinical Neurology and Neurosurgery. – 2019. – Vol. 180. – P. 40–47.
87. Clinical Effects and Complications of Pedicle Screw Augmentation with Bone Cement: Comparison of Fenestrated Screw Augmentation and Vertebroplasty Augmentation / J. H. Kim, D. K. Ahn, W. S. Shin [et al.] // Clinics in Orthopedic Surgery. – 2020. – Vol. 12, № 2. – P.194.
88. Clinical efficacy of bone cement augmented screw fixation for the severe osteoporotic spine / J. H. Seo, C. I. Ju, S. W. Kim [et al.] // Korean Journal of Spine. – 2012. – Vol. 9, № 2. – P. 79.
89. Clinical evaluation of a bone cement-injectable cannulated pedicle screw augmented with polymethylmethacrylate: 128 osteoporotic patients with 42 months of follow-up / Z. Wang, Y. Liu, Z. Rong [et al.]. – DOI 10.6061/clinics/2019/e346 // Clinics. – 2019. – Vol. 74. – URL: <https://www.scielo.br/j/clin/a/3DWH5jyDpXz3QVPMLnQmX3p/?format=pdf&lang=en>. – Дата публикации: 21.12.2018.
90. Clinical results and limitations of indirect decompression in spinal stenosis with laterally implanted interbody cages: results from a prospective cohort study / G. M. Malham, R. M. Parker, B. Goss [et al.] // European Spine Journal. – 2015. – Vol. 24, № 3. – P. 339–345.
91. Clinical Use of Quantitative Computed Tomography–Based Advanced Techniques in the Management of Osteoporosis in Adults: the 2015 ISCD Official Positions—Part

III / K. Engelke, T. Lang, S. Khosla [et al.] // *Journal of Clinical Densitometry*. – 2015. – Vol. 18, № 3. – P. 393–407.

92. Comparing rates of early pedicle screw loosening in posterolateral lumbar fusion with and without transforaminal lumbar interbody fusion / D. H. Kim, R. W. Hwang, G.-H. Lee [et al.] // *The Spine Journal*. – 2020. – Vol. 20, № 9. – P. 1438–1445.

93. Comparing the Biomechanical Stability of Cortical Screw Trajectory Versus Standard Pedicle Screw Trajectory for Short- and Long-Segment Posterior Fixation in 3-Column Thoracic Spinal Injury / A. R. Savardekar, N. G. Rodriguez-Martinez, A. G. U. S. Newcomb [et al.] // *International Journal of Spine Surgery*. – 2019. – Vol. 13, № 3. – P. 245–251.

94. Comparing the efficacy of short-segment pedicle screw instrumentation with and without intermediate screws for treating unstable thoracolumbar fractures / C. Ye, Z. Luo, X. Yu [et al.]. – DOI 10.1097/MD.0000000000007893 // *Medicine*. – 2017. – Vol. 96, № 34. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5572028/pdf/medi-96-e7893.pdf>. – Дата публикации: 25.08.2017.

95. Comparison and prediction of pullout strength of conical and cylindrical pedicle screws within synthetic bone / W. C. Tsai, P. Q. Chen, T. W. Lu // *BMC musculoskeletal disorders*. – 2009. – Vol. 10, № 1. – P. 1–9.

96. Comparison of short-segment pedicle fixation with versus without inclusion of the fracture level in the treatment of mild thoracolumbar burst fractures / C. Sun, G. Guan, X. Liu [et al.] // *International Journal of Surgery*. – 2016. – Vol. 36. – P. 352–357.

97. Correction to: Decreasing thickness and remodeling of ligamentum flavum after oblique lumbar interbody fusion / A. Mahatthanatrakul, H. S. Kim, G. X. Lin [et al.] // *Neuroradiology*. – 2020. – Vol. 62, № 8. – P. 971–978.

98. Correlative radiological, self-assessment and clinical analysis of evolution in instrumented dorsal and lateral fusion for degenerative lumbar spine disease. Autograft versus coralline hydroxyapatite / P. Korovessis, G. Koureas, S. Zacharatos [et al.] // *European Spine Journal*. – 2005. – Vol. 14, № 7. – P. 630–638.

99. Cowley, P. Neuroimaging of spinal canal stenosis / P. Cowley // *Magnetic Resonance Imaging Clinics*. – 2016. – Vol. 24, № 3. – P. 523–539.

100. CT-based classification of long spinal allograft fusion / G. H. Tan, B. G. Goss, P. J. Thorpe [et al.] // *European Spine Journal*. – 2007. – Vol. 16, № 11. – P. 1875–1881.
101. Current concepts and recent advances in understanding and managing lumbar spine stenosis / C. Bagley, M. MacAllister, L. Dosselman [et al.]. – DOI 10.12688/f1000research.16082.1 // *F1000Research*. – 2019. – Vol. 8. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6357993/pdf/f1000research-8-17562.pdf>. – Дата публикации: 31.01.2019.
102. Degenerative changes at the lumbar spine—implications for bone mineral density measurement in elderly women / M. Tenne, F. McGuigan, J. Besjakov et al. // *Osteoporosis International*. – 2013. – Vol. 24, № 4. – P. 1419–1428.
103. Delayed perforation of the aorta by a thoracic pedicle screw / B. Wegener, C. Birkenmaier, A. Fottner [et al.] // *European Spine Journal*. – 2008. – Vol. 17, № 2. – P. 351–354.
104. Delayed presentation of aortic injury by a thoracic pedicle screw / U. Sevuk, A. Mesut, I. Kiraz [et al.] // *Journal of cardiac surgery*. – 2016. – Vol. 31, № 4. – P. 220–230.
105. Design factors of lumbar pedicle screws under bending load: a finite element analysis / J. K. Biswas, T. P. Sahu, M. Rana [et al.] // *Biocybernetics and Biomedical Engineering*. – 2019. – Vol. 39, № 1. – P. 52–62.
106. Designs and Techniques That Improve the Pullout Strength of Pedicle Screws in Osteoporotic Vertebrae: Current Status / T. M. Shea, J. Laun, S. A. Gonzalez-Blohm [et al.] // *BioMed Research International*. – 2014. – Vol. 2014, № 1. – P. 1–4.
107. Diagnosis of lumbar spinal stenosis: a systematic review of the accuracy of diagnostic tests / I. de Graaf, A. Prak, S. Bierma-Zeinstra [et al.] // *Spine*. – 2006. – Vol. 31, № 10. – P. 1168–1176.
108. Diagnosis of lumbar spinal stenosis: an updated systematic review of the accuracy of diagnostic tests / E. I. T. De Schepper, G. M. Overvest, P. Suri [et al.] // *Spine*. – 2013. – Vol. 38, № 8. – P. E469–E481.
109. Diagnostic criteria for primary osteoporosis: year 2000 revision / H. Orimo, Y. Hayashi, M. Fukunaga [et al.] // *Journal of bone and mineral metabolism*. – 2001. – Vol. 19, № 6. – P. 331–337.

110. Does Combined Anterior-Posterior Approach Improve Outcomes Compared with Posterioronly Approach in Traumatic Thoracolumbar Burst Fractures?: A Systematic Review / T. Tan, T. J. Donohoe, M. S. J. Huang [et al.] // *Asian Spine Journal*. – 2020. – Vol. 14, № 3. – P. 388–398.
111. Does Operative or Nonoperative Treatment Achieve Better Results in A3 and A4 Spinal Fractures Without Neurological Deficit?: Systematic Literature Review With Meta-Analysis / E. Rometsch, M. Spruit, R. Härtl [et al.] // *Global Spine Journal*. – 2017. – Vol. 7, № 4. – P. 350–372.
112. Dual-energy x-ray absorptiometry vs computed tomography: comparison of bone mineral density measurements in predicting postoperative spinal fusion outcomes / A. Vance, A. Mazal, S. G. Aoun [et al.] // *Neurosurgery*. – 2019. – Vol. 66, № Supplement_1. – P. nyz310_607.
113. Dynamic changes in the dimensions of the lumbar spinal canal: an experimental study in vitro / N. Schönström, S. Lindahl, J. Willén [et al.] // *Journal of orthopaedic research*. – 1989. – Vol. 7, № 1. – P. 115–121.
114. Dynamic posture-related preoperative pain as a single clinical criterion in patient selection for extreme lateral interbody fusion without direct decompression / K. Z. Lim, C. Daly, J. Brown [et al.] // *Global spine journal*. – 2019. – Vol. 9, № 6. – P. 575–582.
115. Early clinical outcome of lumbar spinal fixation with cortical bone trajectory pedicle screws in patients with osteoporosis with degenerative disease / L. Liu, S. Zhang, G. Liu [et al.] // *Orthopedics*. – 2019. – Vol. 42, № 5. – P. e465–e471.
116. Ebata S. Adequate cage placement for a satisfactory outcome after lumbar lateral interbody fusion with MRI and CT analysis / S. Ebata, T. Ohba, H. Haro // *Spine Surgery and Related Research*. – 2018. – Vol. 2, № 1. – P. 53–59.
117. Effect of augmentation techniques on the failure of pedicle screws under cranio-caudal cyclic loading / R. Bostelmann, A. Keiler, H. J. Steiger [et al.] // *European Spine Journal*. – 2017. – Vol. 26, № 1. – P.181–188.
118. Effect of different fixation techniques on segmental kinematics and load sharing of lumbar spine: a FEM study / A. Kiapour, A. M. Kiapour, H. Serhan [et al.] // *Summer*

Bioengineering Conference. – American Society of Mechanical Engineers, 2012. – Vol. 44809. – P. 1127–1128.

119. Effect of graded facetectomy on lumbar biomechanics / Z. Zeng, R. Zhu, Y. Wu [et al.]. – DOI 10.1155/2017/7981513 // Journal of Healthcare Engineering. – 2017. – Vol. 2017. – URL: <https://downloads.hindawi.com/journals/jhe/2017/7981513.pdf>. – Дата публикации: 19.02.2017.

120. Effect of vertebroplasty filler materials on viability and gene expression of human nucleus pulposus cells / Á. Lazáry, G. Speer, P. P. Varga [et al.] // Journal of ortopaedic research. – 2008. – Vol. 26, № 5. – P. 601–607.

121. Effects of intradiscal vacuum phenomenon on surgical outcome of lateral interbody fusion for degenerative lumbar disease / C. P. Yen, J. M. Beckman, A. C. Vivas [et al.] // Journal of Neurosurgery: Spine. – 2017. – Vol. 26, № 4. – P. 419–425.

122. Effects of pilot hole preparation technique on pedicle screw fixation in different regions of the osteoporotic thoracic and lumbar spine / J. J. Carmouche, R. W. Molinari, T. Gerlinger [et al.] // Journal of Neurosurgery: Spine. – 2005. – Vol. 3, № 5. – P. 364–370.

123. Elmasry, S. Effectiveness of pedicle screw inclusion at the fracture level in short-segment fixation constructs for the treatment of thoracolumbar burst fractures: a computational biomechanics analysis / S. Elmasry, S. Asfour, F. Travascio // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. – 2017. – Vol. 20, № 13. – P. 1412–1420.

124. Epidemiological profile of thoracolumbar fracture (TLF) over a period of 10 years in Tianjin, China / B. Li, C. Sun, C. Zhao [et al.] // The Journal of Spinal Cord Medicine. – 2019. – Vol. 42, № 2. – P. 178–183.

125. Epstein, N. E. Extreme lateral lumbar interbody fusion: Do the cons outweigh the pros? / N. E. Epstein // Surgical Neurology International. – 2016. – Vol. 7, № Suppl 25. – P. S692.

126. European guidance for the diagnosis and management of osteoporosis in postmenopausal women / J. A. Kanis, E. V. McCloskey, H. Johansson [et al.] // Osteoporosis International. – 2019. – Vol. 30, № 1. – P. 3–44.

127. Evaluation of Indirect Decompression of the Lumbar Spinal Canal Following Minimally Invasive Lateral Transpsoas Interbody Fusion: Radiographic and Outcome Analysis / E. H. Elowitz, D. S. Yanni, M. Chwajol [et al.] // *min - Minimally Invasive Neurosurgery*. – 2011. – Vol. 54, № 05/06. – P. 201–206.
128. Executive functions predict fracture risk in postmenopausal women assessed for osteoporosis / A. Catalano, A. Sardella, F. Bellone [et al.] // *Aging clinical and experimental research*. – 2020. – Vol. 32, № 11. – P. 2251–2257.
129. Factors predicting long-term outcome after short-segment posterior fixation for traumatic thoracolumbar fractures / H. B. S. Sodhi, A. R. Savardekar, R. B. Chauhan [et al.] // *Surgical Neurology International*. – 2017. – Vol. 8, № 1. – P. 233.
130. Fan, W. A comparison of the influence of three different lumbar interbody fusion approaches on stress in the pedicle screw fixation system: finite element static and vibration analyses / W. Fan, L. X. Guo // *Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*. – 2019. – Vol. 35, № 3. – P. e3162.
131. Farrokhi, M. *European spine journal: official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* / M. R. Farrokhi, A. Razmkon, Z. Maghami // *European Spine Journal*. – 2010. – Vol. 19, № 10. – P. 1651–1656.
132. Finite Element Analysis of Short- Versus Long-Segment Posterior Fixation for Thoracolumbar Burst Fracture / R. Basaran, M. Efendioglu, M. Kaksi [et al.] // *World Neurosurgery*. – 2019. – Vol. 128. – P. e1109–e1117.
133. Fortin, J. D. Imaging in lumbar spinal stenosis / J. D. Fortin, M. T. Wheeler // *Pain Physician*. – 2004. – Vol. 7, № 1. – P. 133–139.
134. Fu, T. S. Fluoroscopy-guided percutaneous vertebroplasty for symptomatic loosened pedicle screw and instrumentation-associated vertebral fracture: an evaluation of initial experiences and technical note / T. S. Fu, Y. D. Li // *Journal of Neurosurgery: Spine*. – 2018. – Vol. 28, № 4. – P. 364–371.
135. Gabel, B. C. An algorithm to predict success of indirect decompression using the extreme lateral lumbar interbody fusion procedure / B. C. Gabel, R. Hoshide, W. Taylor. – DOI 10.7759/cureus.317 // *Cureus*. – 2015. – Vol. 7, № 9. – URL:

https://assets.cureus.com/uploads/original_article/pdf/3085/1613124631-20210212-27978-162y488.pdf. – Дата публикации: 08.09.2015.

136. Gazzeri, R. Surgical treatment of degenerative and traumatic spinal diseases with expandable screws in patients with osteoporosis: 2-year follow-up clinical study / R. Gazzeri, R. Roperto, C. Fiore // *Journal of Neurosurgery: Spine*. – 2016. – Vol. 25, № 5. – С. 610–619.

137. Georgy, B. A. Clinical experience with high-viscosity cements for percutaneous vertebral body augmentation: occurrence, degree, and location of cement leakage compared with kyphoplasty / B. A. Georgy // *American journal of neuroradiology*. – 2010. – Т. 31, № 3. – С. 504–508.

138. Guideline update for the performance of fusion procedures for degenerative disease of the lumbar spine. Part 9: lumbar fusion for stenosis with spondylolisthesis / D. K. Resnick, W. C. Watters, A. Sharan [et al.] // *Journal of Neurosurgery: Spine*. – 2014. – Vol. 21, № 1. – P. 54–61.

139. Guideline update for the performance of fusion procedures for degenerative disease of the lumbar spine. Part 8: Lumbar fusion for disc herniation and radiculopathy / J. C. Wang, A. T. Dailey, P. V. Mummaneni [et al.] // *Journal of Neurosurgery: Spine SPI*. – 2014. – Vol. 21, № 1. – P. 48–53.

140. Guideline update for the performance of fusion procedures for degenerative disease of the lumbar spine. Part 11: Interbody techniques for lumbar fusion / P. V. Mummaneni, S. S. Dhall, J. C. Eck [et al.] // *Journal of Neurosurgery: Spine*. – 2014. – Vol. 21, № 1. – P. 67–74.

141. Hartman, J. Radiologic evaluation of lumbar spinal stenosis: the integration of sagittal and axial views in decision making for minimally invasive surgical procedures / J. Hartman, M. Granville, R. E. Jacobson. – DOI 10.7759/cureus.4268 // *Cureus*. – 2019. – Vol. 11, № 3. – URL: https://assets.cureus.com/uploads/technical_report/pdf/18207/1612428654-1612428647-20210204-30437-1chhfk6.pdf. – Дата публикации: 19.03.2019.

142. Has the Incidence of Thoracolumbar Spine Injuries Increased in the United States From 1998 to 2011? / A. N. Doud, A. A. Weaver, J. W. Talton [et al.] // *Clinical Orthopaedics and Related Research*. – 2015. – Vol. 473, № 1. – P. 297–304.
143. Height loss, vertebral fractures, and the misclassification of osteoporosis / W. W. Xu, S. Perera, D. Medich // *Bone*. – 2011. – Vol. 48, № 2. – P. 307–311.
144. High frequency of low-virulent microorganisms detected by sonication of pedicle screws: a potential cause for implant failure / V. Prinz, S. Bayerl, N. Renz [et al.] // *Journal of Neurosurgery: Spine*. – 2019. – Vol. 31 № 3. – P. 424–429.
145. Hoppe, S. Pedicle screw augmentation in osteoporotic spine: indications, limitations and technical aspects / S. Hoppe, M. J. B. Keel // *European journal of trauma and emergency surgery*. – 2017. – Vol. 43, № 1. – P. 3–8.
146. Hounsfield units value is a better predictor of pedicle screw loosening than the T-score of DXA in patients with lumbar degenerative diseases / D. Zou, Z. Sun, S. Zhou [et al.] // *European Spine Journal*. – 2020. – Vol. 29, № 5. – P. 1105–1111.
147. Hounsfield unit of screw trajectory as a predictor of pedicle screw loosening after single level lumbar interbody fusion / Y. Sakai, S. Takenaka, Y. Matsuo [et al.] // *Journal of Orthopaedic Science*. – 2018. – Vol. 23, № 5. – P. 734–738.
148. Hounsfield units as predictor for cage subsidence and loss of reduction: following posterior-anterior stabilization in thoracolumbar spine fractures / B. W. Ullrich, P. Schenk, U. J. Spiegl [et al.] // *European Spine Journal*. – 2018. – Vol. 27, № 12. – P. 3034–3042.
149. Hounsfield units for assessing bone mineral density and strength: a tool for osteoporosis management / J. J. Schreiber, P. A. Anderson, H. G. Rosas [et al.] // *The Journal of Bone and Joint Surgery*. – 2011. – Vol. 93, № 11. – P. 1057–1063.
150. Identification of Pedicle Screw Pullout Load Paths for Osteoporotic Vertebrae / V. Krishnan, V. Varghese, G. S. Kumar [et al.] // *Asian spine journal*. – 2020. – Vol. 14, № 3. – P. 273.
151. Impact of Surgical Approach on Clinical Outcomes in the Treatment of Lumbar Pseudarthrosis / R. K. Owens, M. Djurasovic, C. H. Crawford [et al.] // *Global Spine Journal*. – 2016. – Vol. 6, № 8. – P. 786–791.

152. Impaired bone mineral density as a predictor of graft subsidence following minimally invasive transpoas lateral lumbar interbody fusion / Z. J. Tempel, G. S. Gandhoke, D. O. Okonkwo [et al.] // *European Spine Journal*. – 2015. – Vol. 24, № 3. – P. 414–419.
153. Implant related complications in patients operated on with expandable pedicle screws and technical solutions for revision surgery / A. Bokov, A. Aleynik, A. Dydykin [et al.] // *Australasian Medical Journal*. – 2018. – Vol. 11, № 8. – P. 443–447.
154. Importance of bone mineral density in instrumented spine fusions / R. H. Wittenberg, M. Shea, D. E. Swartz [et al.] // *Spine*. – 1991. – Vol. 16, № 6. – P. 647–652.
155. In vitro study of biomechanical behavior of anterior and transforaminal lumbar interbody instrumentation techniques / T. K. Niemeyer, M. Koriller, L. Claes [et al.] // *Neurosurgery*. – 2006. – Vol. 59, № 6. – P. 1271–1277.
156. In vivo assessment of trabecular bone microarchitecture by high-resolution peripheral quantitative computed tomography / S. Boutrouy, M. L. Bouxsein, F. Munoz [et al.] // *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*. – 2005. – Vol. 90, № 12. – P. 6508–6515.
157. Increasing Bending Strength and Pullout Strength in Conical Pedicle Screws: Biomechanical Tests and Finite Element Analyses / C. K. Chao, C. C. Hsu, J. L. Wang [et al.] // *Journal of Spinal Disorders & Techniques*. – 2008. – Vol. 21, № 2. – P. 130–138.
158. Increasing Fusion Rate Between 1 and 2 Years After Instrumented Posterolateral Spinal Fusion and the Role of Bone Grafting / A. M. Lehr, F. C. Oner, D. Delawi [et al.] // *Spine*. – 2020. – Vol. 45, № 20. – P. 1403.
159. Indirect Decompression of Lumbar Stenosis With Transpoas Interbody Cages and Percutaneous Posterior Instrumentation / A. E. Castellvi, T. W. Nienke, G. A. Marulanda [et al.] // *Clinical Orthopaedics and Related Research*. – 2014. – Vol. 472, № 6. – P. 1784–1791.
160. Influence of bone mineral density on pedicle screw fixation: a study of pedicle screw fixation augmenting posterior lumbar interbody fusion in elderly patients / K.

Okuyama, E. Abe, T. Suzuki [et al.] // *The Spine Journal*. – 2001. – Vol. 1, № 6. – P. 402–407.

161. Influence of the screw augmentation technique and a diameter increase on pedicle screw fixation in the osteoporotic spine: pullout versus fatigue testing / R. A. Kueny, J. P. Kolb, W. Lehmann [et al.] // *European Spine Journal*. – 2014. – Vol. 23, № 10. – P.2196–2202.

162. Influence of thread design on pedicle screw fixation / M. H. Krenn, W. P. Piotrowski, R. Penzkofer [et al.] // *IJournal of Neurosurgery: Spine SPI*. – 2008. – Vol. 9, № 1. – P. 90–95.

163. Inhibition of vertebral endplate perfusion results in decreased intervertebral disc intranuclear diffusive transport / M. Van Der Werf, P. Lezuo, O. Maissen [et al.] // *Journal of anatomy*. – 2007. – Vol. 211, № 6. – P. 769–774.

164. Insertion torque is not a good predictor of pedicle screw loosening after spinal instrumentation: a prospective study in 8 patients / B. Sandén, C. Olerud, S. Larsson [et al.] // *Patient safety in surgery*. – 2010. – Vol. 4, № 14. – P. 1–5.

165. Insufficient stability of pedicle screws in osteoporotic vertebrae: biomechanical correlation of bone mineral density and pedicle screw fixation strength / L. Weiser, G. Huber, K. Sellenschloh [et al.] // *European Spine Journal*. – 2017. – Vol. 26, № 11. – P. 2891–2897.

166. International Standards For Neurological Classification Of Spinal Cord Injury / R. J. Marino, T. Barros, F. Biering-Sorensen [et al.] // *The Journal of Spinal Cord Medicine*. – 2003. – Vol. 26, № sup1. – P.S50–S56.

167. Interobserver and intraobserver agreement of radiograph interpretation with and without pedicle screw implants: the need for a detailed classification system in posterolateral spinal fusion / F. B. Christensen, M. Laursen, J. Gelineck [et al.] // *Spine*. – 2001. – Vol. 26, № 5. – P. 538–543.

168. Inter-observer reliability of detecting Dynesys pedicle screw using plain X-rays: a study on 50 post-operative patients / F. Dakhil-Jerew, H. Jadeja, A. Cohen [et al.] // *European Spine Journal*. – 2009. – Vol. 18, № 10. – P. 1486–1493.

169. Intraoperative PEEP-ventilation during PMMA-injection for augmented pedicle screws: improvement of leakage rate in spinal surgery / A. El. Saman, A. Kelm, S. Meier [et al.] // *European Journal of Trauma and Emergency Surgery*. – 2013. – Vol. 39, № 5. – P. 461–468.
170. Is Indirect Decompression and Fusion More Effective than Direct Decompression and Fusion for Treating Degenerative Lumbar Spinal Stenosis With Instability? A Systematic Review and meta-Analysis / M. J. Gagliardi, A. J. Guiroy, G. Camino-Willhuber [et al.] // *Global Spine Journal*. – 2022. – P. 21925682221098362.
171. Is reduction better than arthrodesis in situ in surgical management of low-grade spondylolisthesis? A system review and meta analysis / X. Bai, J. Chen, L. Liu [et al.] // *European Spine Journal*. – 2017. – Vol. 26, № 3. – P. 606–618.
172. ISCD position development conference on clinical use of quantitative computed tomography-based finite element analysis of the hip and spine in the management of osteoporosis in adults / P. Zysset, L. Qin, T. Lang [et al.] // *The International Society for Clinical Densitometry*. – 2015. – Vol. 18, № 3. – P. 359–392.
173. Jenkins, K. Cement implantation syndrome / K. Jenkins, P. J. Wake // *Anaesthesia*. – 2002. – Vol. 57, № 4. – P. 404–418.
174. Jiang, S. D. Which procedure is better for lumbar interbody fusion: anterior lumbar interbody fusion or transforaminal lumbar interbody fusion? / S. D. Jiang, J. W. Chen, L. S. Jiang // *Archives of orthopaedic and trauma surgery*. – 2012. – Vol. 132, № 9. – P. 1259–1266.
175. Joaquim, A. F. Spinal Reconstruction Techniques for Traumatic Spinal Injuries: A Systematic Review of Biomechanical Studies / A. F. Joaquim, J. P. Maslak, A. A. Patel // *Global Spine Journal*. – 2019. – Vol. 9, № 3. – P. 338–347.
176. Kanis, J. A. Assessment of fracture risk and its application to screening for postmenopausal osteoporosis: Synopsis of a WHO report / J. A. Kanis // *Osteoporosis International*. – 1994. – Vol. 4, № 6. – P. 368–381.
177. Katsuura, Y. The epidemiology of thoracolumbar trauma: A meta-analysis / Y. Katsuura, J. M. Osborn, G. W. Cason // *Journal of Orthopaedics*. – 2016. – Vol. 13, № 4. – P. 383–388.

178. Kim, H.-Y. Statistical notes for clinical researchers: Chi-squared test and Fisher's exact test / H.-Y. Kim // *Restorative Dentistry & Endodontics*. – 2017. – Vol. 42, № 2. – P. 152.
179. Kim, Y. Y. Assessment of pedicle screw pullout strength based on various screw designs and bone densities—an ex vivo biomechanical study / Y. Y. Kim, W. S. Choi, K. W. Rhyu // *The Spine Journal*. – 2012. – Vol. 12, № 2. – P. 164–168.
180. Lateral Lumbar Interbody Fusion: What Is the Evidence of Indirect Neural Decompression? A Systematic Review of the Literature / M. Formica, E. Quarto, A. Zanirato [et al.] // *HSS Journal*. – 2020. – Vol. 16, № 2. – P. 143–154.
181. Leakage of cement in percutaneous transpedicular vertebroplasty for painful osteoporotic compression fractures / J. S. Yeom, W. J. Kim, W. S. Choy [et al.] // *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume*. – 2003. – Vol. 85, № 1. – P. 83–89.
182. Lee, K. K. Effects of laminectomy and facetectomy on the stability of the lumbar motion segment / K. K. Lee, E. C. Teo // *Medical Engineering & Physics*. – 2004. – Vol. 26, № 3. – P. 183–192.
183. Lee, S. *European spine journal: official publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society* / S. Lee, S. K. Kim, S. H. Lee // *European Spine Journal*. – 2007. – Vol. 16, № 3. – P. 431–437.
184. Leonova, O. N. MIS-TLIF versus O-TLIF for single-level degenerative stenosis: study protocol for randomised controlled trial / O. N. Leonova, E. A. Cherepanov, A. V. Krutko // *BMJ open*. – 2021. – Vol. 11, № 3. – P. e041134.
185. Long versus short segment instrumentation in osteoporotic thoracolumbar vertebral fracture / M. Girardo, A. Massè, S. Risitano [et al.] // *Asian Spine Journal*. – 2021. – Vol. 15, № 4. – P. 424.
186. Lu, T. Comparison of Biomechanical Performance Among Posterolateral Fusion and Transforaminal, Extreme, and Oblique Lumbar Interbody Fusion: A Finite Element Analysis / T. Lu, Y. Lu // *World Neurosurgery*. – 2019. – Vol. 129. – P. e890–e899.

187. Lumbar computed tomography scans are not appropriate surrogates for bone mineral density scans in primary adult spinal deformity / E. M. Kohan, V. M. Nemani, S. Hershman [et al.] // *Neurosurgical focus*. – 2017. – Vol. 43, № 6. – P. E4.
188. Lumbar degenerative spondylolisthesis epidemiology: A systematic review with a focus on gender-specific and age-specific prevalence / Y. X. J. Wang, Z. Káplár, M. Deng [et al.] // *Journal of Orthopaedic Translation*. – 2017. – Vol. 11. – P. 39–52.
189. Lumbar herniated disk disease and canal stenosis: prospective evaluation by surface coil MR, CT, and myelography / M. T. Modic, T. Masaryk, F. Boumphrey [et al.] // *American journal of neuroradiology*. – 1986. – Vol. 7, № 4. – P. 709–717.
190. Lumbar interbody fusion: techniques, indications and comparison of interbody fusion options including PLIF, TLIF, MI-TLIF, OLIF/ATP, LLIF and ALIF / R. J. Mobbs, K. Phan, G. Malham [et al.] // *Journal of spine surgery*. – 2015. – Vol. 1, № 1. – P. 2–18.
191. Lumbar intervertebral instability: a review / A. Leone, G. Guglielmi, V. N. Cassar-Pullicino [et al.] // *Radiology*. – 2007. – Vol. 245, № 1. – P. 62–77.
192. Lumbar spinal stenosis: a review of current concepts in evaluation, management, and outcome measurements / J. M. Fritz, A. Delitto, W. C. Welch [et al.] // *Archives of physical medicine and rehabilitation*. – 1998. – Vol. 79, № 6. – P. 700–708.
193. Lumbosacral fixation using expandable pedicle screws: an alternative in reoperation and osteoporosis / S. D. Cook, J. Barbera, M. Rubi [et al.] // *The Spine Journal*. – 2001. – Vol. 1, № 2. – C. 109–114.
194. Lurie, J. Management of Lumbar Spinal Stenosis / J. Lurie, C. Tomkins-Lane // *BMJ*. – 2016. – Vol. 352. – P. h6234.
195. Magnetic resonance classification of lumbar intervertebral disc degeneration / C. W. A. Pfirrmann, A. Metzdorf, M. Zanetti [et al.] // *Spine*. – 2001. – Vol. 26, № 17. – C. 1873–1878.
196. Majkowski, R. S. The effect of bleeding on the cement-bone interface. An experimental study / R. S. Majkowski, G. C. Bannister, A. W. Miles // *Clinical orthopaedics and related research*. – 1994. – № 299. – P. 293–297.

197. Management of pulmonary cement embolism after percutaneous vertebroplasty and kyphoplasty: a systematic review of the literature / A. Krueger, C. Bliemel, R. Zettl [et al.] // *European Spine Journal*. – 2009. – Vol. 18, № 9. – P. 1257–1265.
198. Management of thoracolumbar spine fractures / K. B. Wood, W. Li, D. S. Lebl [et al.] // *The Spine Journal*. – 2014. – Vol. 14, № 1. – P. 145–164.
199. Managing Incomplete and Complete Thoracolumbar Burst Fractures (AO Spine A3 and A4). Results from a Prospective Single-Center Study Comparing Posterior Percutaneous Instrumentation plus Mini-Open Anterolateral Fusion versus Single-Stage Posterior Instrumented Fusion / J. Todeschi, M. Ganau, I. Zaed [et al.] // *World Neurosurgery*. – 2021. – Vol. 150. – P. e657–e667.
200. Martin-Somoza, F. J. Long-Term Reliability of the Two-Segment Fusion Technique in the Treatment of Thoracolumbar Fractures Using Screws in the Fractured Vertebra / F. J. Martin-Somoza, J. M. C. Escribano, J. V. Ramírez-Villaescusa // *International Journal of Spine Surgery*. – 2021. – Vol. 15, № 1. – P. 169–178.
201. Matsukawa, K. Impact of screw diameter and length on pedicle screw fixation strength in osteoporotic vertebrae: a finite element analysis / K. Matsukawa, Y. Yato, H. Imabayashi // *Asian Spine Journal*. – 2021. – Vol. 15, № 5. – P. 566.
202. Mattei, T. A. The first shot is your best shot! Detrimental biomechanical effects of revising suboptimally placed pedicle screws / T. A. Mattei, E. Mendel // *World Neurosurgery*. – 2015. – Vol. 83, № 3. – P. 296–298.
203. McCormack, T. The load sharing classification of spine fractures / T. McCormack, E. Karaikovic, R. W. Gaines // *Spine*. – 1994. – Vol. 19, № 15. – P. 1741–1744.
204. McNeil, B. J. Statistical Approaches to the Analysis of Receiver Operating Characteristic (ROC) Curves / B. J. McNeil, J. A. Hanley // *Medical Decision Making*. – 1984. – Vol. 4, № 2. – P. 137–150.
205. Mehmanparast, H. Comparison of pedicle screw loosening mechanisms and the effect on fixation strength / H. Mehmanparast, Y. Petit, J. M. Mac-Thiong // *Journal of Biomechanical Engineering*. – 2015. – Vol. 137, № 12. – P. 121003.

206. Mesfin, A. Failure of cement-augmented pedicle screws in the osteoporotic spine: a case report / A. Mesfin, C. B. Komanski, A. J. Khanna // *Geriatric orthopaedic surgery & rehabilitation*. – 2013. – Vol. 4, № 3. – P. 84–88.
207. Mid-range outcomes in 64 consecutive cases of multilevel fusion for degenerative diseases of the lumbar spine / M. Röllinghoff, K. Schlüter-Brust, D. Groos [et al.]. – DOI 10.4081/or.2010.e3 // *Orthopedic Reviews*. – 2010. – Vol. 2, №1. – P. e3. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3143945/pdf/or-2010-1-e3.pdf>. – Дата публикации: 31.12.2009.
208. MR imaging and CT in osteoarthritis of the lumbar facet joints / D. Weishaupt, M. Zanetti, N. Boos [et al.] // *Skeletal Radiology*. – 1999. – Vol. 28, № 4 – P.215–219.
209. MRI versus CT for the diagnosis of lumbar spinal stenosis / S. S. Eun, H. Y. Lee, S. H. Lee [et al.] // *Journal of Neuroradiology*. – 2012. – Vol. 39, № 2. – P. 104–109.
210. Mull, R. T. Mass estimates by computed tomography: physical density from CT numbers / R. T. Mull // *American Journal of Roentgenology*. – 1984. – Vol. 143, № 5. – P. 1101–1104.
211. Navarro-Ramirez R. et al. Are locked facets a contraindication for extreme lateral interbody fusion? / R. Navarro-Ramirez, G. Lang, Y. Moriguchi [et al.] // *World neurosurgery*. – 2017. – Vol. 100. – P. 607–618.
212. Neurological deficit due to cement extravasation following a vertebral augmentation procedure / G. S. Sidhu, C. K. Kepler, K. E. Savage [et al.] // *Journal of Neurosurgery: Spine*. – 2013. – Vol. 19, № 1. – P. 61–70.
213. Normal and degenerative posterior spinal structures: MR imaging / N. Grenier, H. Y. Kressel, M. L. Schiebler [et al.] // *Radiology*. – 1987. – Vol. 165, № 2. – P. 517–525.
214. Omidi-Kashani, F. Lumbar spinal stenosis: who should be fused? An updated review / F. Omidi-Kashani, E. G. Hasankhani, A. Ashjazadeh // *Asian Spine Journal*. – 2014. – Vol. 8, № 4. – P. 521–530.
215. On behalf of the LumbSten Research Collaboration ZS. Quantitative radiologic criteria for the diagnosis of lumbar spinal stenosis: a systematic literature review / J. Steurer, S. Roner, R. Gnannt [et al.] // *BMC Musculoskeletal Disorders*. BioMed Central Ltd. – 2011. – Vol. 12. – P. 175.

216. Opportunistic screening for osteoporosis in abdominal computed tomography for Chinese population / Y. L. Li, K. H. Wong, M. W. M. Law [et al.] // Archives of Osteoporosis. – 2018. – Vol. 13, № 1. – P. 1–7.
217. Opportunistic screening for osteoporosis on routine computed tomography? An external validation study / C. F. Buckens, G. Dijkhuis, B. de Keizer [et al.] // European Radiology. – 2015. – Vol. 25, № 7. – P. 2074–2079.
218. Opportunistic screening for osteoporosis using abdominal computed tomography scans obtained for other indications / P. J. Pickhardt, B. D. Pooler, T. Lauder [et al.] // Annals of internal medicine. – 2013. – Vol. 158, № 8. – P. 588–595.
219. Opportunistic screening for osteoporosis using the sagittal reconstruction from routine abdominal CT for combined assessment of vertebral fractures and density / S. J. Lee, N. Binkley, M. G. Lubner [et al.] // Osteoporosis International. – 2016. – Vol. 27, № 3. – P. 1131–1136.
220. Osteoporotic Thoracolumbar Fractures – How Are They Different? – Classification and Treatment Algorithm / S. Rajasekaran, R. Kanna, K. J. Schnake [et al.] // Journal of Orthopaedic Trauma. – 2017. – Vol. 31. – P. S49–S56.
221. Osteoporotic vertebral fractures: predictive factors for conservative treatment failure. A systematic review / M. Muratore, A. Ferrera, A. Masse [et al.] // European Spine Journal. – 2018. – Vol. 27, № 10. – P. 2565–2576.
222. Outcomes with fracture-level transpedicular screws used for thoracolumbar junction fractures / S. V. Likhachev, V. V. Zaretskov, V. B. Arsenievich [et al.] // Genij Ortopedii. – 2020. – Vol. 26, № 4. – P. 548–554.
223. Overview of Fracture Prediction Tools / J. A. Kanis, N. C. Harvey, H. Johansson [et al.] // Journal of Clinical Densitometry. – 2017. – Vol. 20, № 3. – P. 444–450.
224. Parapedicular vertebral augmentation with polymethylmetacrylate for pedicle screw loosening / O. Clerk-Lamalice, Z. Irani, M. Growney [et al.] // Case Reports. – 2018. – Vol. 2018. – P. bcr-2017-013548.
225. Patel, A. Indirect decompression of lumbar stenosis / A. Patel, T. D. Cha // Seminars in Spine Surgery. – 2019. – Vol. 31, № 3. – P. 100712.

226. Pedicle Screw Designs in Spinal Surgery / W. R. D. Seng, S. M. Chou, S. S. Siddiqui [et al.] // *SPINE*. – 2019. – Vol. 44, № 3. – P. E144–E149.
227. Pedicle Screw Fixation in Single-Level, Double-Level, or Multilevel Posterior Lumbar Fusion for Osteoporotic Spine: A Retrospective Study with a Minimum 2-Year Follow-Up / H. Guo, Y. Tang, D. Guo [et al.] // *World Neurosurgery*. – 2020. – Vol. 140. – P. e121-e128.
228. Pedicle screw fixation of thoracolumbar fractures: conventional short segment versus short segment with intermediate screws at the fracture level—a systematic review and meta-analysis / C. Kapoen, Y. Liu, F. W. Bloemers [et al.] // *European Spine Journal*. – 2020. – Vol. 29, № 10. – P. 2491–2504.
229. Pedicle screw instrumentation of thoracolumbar burst fractures: Biomechanical evaluation of screw configuration with pedicle screws at the level of the fracture / M. J. Bolesta, T. Caron, S. R. Chinthakunta [et al.] // *Journal of Spine Surgery*. – 2012. – Vol. 6. – P. 200–205.
230. Pedicle screw loosening is correlated to chronic subclinical deep implant infection: a retrospective database analysis / L. Leitner, I. Malaj, P. Sadoghi [et al.] // *European Spine Journal*. – 2018. – Vol. 27, № 10. – P. 2529–2535.
231. Pedicle screw loosening: a clinically relevant complication? / F. Galbusera, D. Volkheimer, S. Reitmaier [et al.] // *European Spine Journal*. – 2015. – Vol. 24, № 5. – P. 1005–1016.
232. Pedicle screw loosening: the value of radiological imagings and the identification of risk factors assessed by extraction torque during screw removal surgery / X. Wu, J. Shi, J. Wu [et al.] // *Journal of Orthopaedics Surgery and Research*. – 2019. – Vol. 14, № 1. – P. 1–9.
233. Pedicle Screw Safety: How Much Anterior Breach Is Safe? / V. Sarwahi, M. Payares, S. Wendolowski [et al.] // *Spine*. – 2017. – Vol. 42, № 22. – P. E1305–E1310.
234. Pedicle Screws Loosening in Patients With Degenerative Diseases of the Lumbar Spine: Potential Risk Factors and Relative Contribution / A. Bokov, A. Bulkin, A. Aleynik [et al.] // *Global Spine Journal*. – 2019. – Vol. 9, № 1. – P. 55–61.

235. Pedikül vida revizyonlarında polimetilmetakrilat ile güçlendirilmiş ve ucu genişleyebilen pedikül vidalarının biyomekanik karşılaştırılması / B. Bostan, İ. Esenkaya, T. Güneş [et al.] // *Acta Orthop Traumatol Turc.* – 2009. – Vol. 43, № 3. – P. 272–276.
236. Peng, C.-Y. J. An Introduction to Logistic Regression Analysis and Reporting / C.-Y. J. Peng, K. L. Lee, G. M. Ingersoll // *The Journal of Educational Research.* – 2002. – Vol. 96, № 1. – P. 3–14.
237. Penning, L. Functional pathology of lumbar spinal stenosis / L. Penning // *Clinical Biomechanics.* – 1992. – Vol. 7, № 1. – P. 3–17.
238. Pfeifer, B. A. Repair of failed transpedicle screw fixation. A biomechanical study comparing polymethylmethacrylate, milled bone, and matchstick bone reconstruction / B. A. Pfeifer, M. H. Krag, C. Johnson // *Spine.* – 1994. – Vol. 19, № 3. – P. 350–353.
239. Pfeiffer, F. M. A Comparison of Pullout Strength for Pedicle Screws of Different Designs / F. M. Pfeiffer, D. L. Abernathie // *Spine.* – 2006. – Vol. 31, № 23. – P. E867–E870.
240. Polly, Jr. D. W. Revision pedicle screws: bigger, longer shims-what is best? / D. W. Jr. Polly, J. R. Orchowski, R. G. Ellenbogen // *Spine.* – 1998. – Vol. 23, № 12. – P. 1374–1379.
241. Polymethylmethacrylate Augmentation of Pedicle Screws Increases the Initial Fixation in Osteoporotic Spine Patients / K. Sawakami, A. Yamazaki, S. Ishikawa [et al.] // *Journal of Spinal Disorders & Techniques.* – 2012. – Vol. 25, № 2. – P. E28–E35.
242. Posterior short segment pedicle screw fixation for the treatment of thoracolumbar fracture / M. Aoui, N. Sahnoun, M. Abid [et al.]. – DOI 10.11604/pamj.2020.35.102.21540 // *The Pan African Medical Journal.* – 2020. – Vol. 35. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7320785/pdf/PAMJ-35-102.pdf>. – Дата публикации: 07.04.2020.
243. Posterior-only Stabilization for Traumatic Thoracolumbar Burst Fractures / O. R. Hariri, S. Kashyap, A. Takayanagi [et al.] // *Cureus.* – 2018. – Vol. 10, № 3. – P. e2296.
244. Posterolateral lumbar fusion: Relationship between computed tomography Hounsfield units and symptomatic pseudoarthrosis / H. S. Nguyen, S. Shabani, M. Patel [et al.] // *Surgical neurology international.* – 2015. – Vol. 6, № Suppl 24. – P. S611.

245. Potential and Limitations of Neural Decompression in Extreme Lateral Interbody Fusion—A Systematic Review / G. Lang, M. Perrech, R. Navarro-Ramirez [et al.] // *World Neurosurgery*. – 2017. – Vol. 101. – P. 99–113.
246. Predictive validity of preoperative CT scans and the risk of pedicle screw loosening in spinal surgery / J. Bredow, C. K. Boese, C. M. L. Werner [et al.] // *Archives of orthopaedic and trauma surgery*. – 2016. – Vol. 136, № 8. – P. 1063–1067.
247. Predictive value of DXA appendicular lean mass for incident fractures, falls, and mortality, independent of prior falls, FRAX, and BMD: findings from the Women's Health Initiative (WHI) / N. C. Harvey, J. A. Kanis, E. Liu [et al.] // *Journal of Bone and Mineral Research*. – 2021. – Vol. 36, № 4. – P. 654–661.
248. Predictors for second-stage posterior direct decompression after lateral lumbar interbody fusion: a review of five hundred fifty-seven patients in the past five years / J. Li, T. Xu, N. Zhang [et al.] // *International Orthopaedics*. – 2022. – P. 1–9.
249. Presentation and management of IVC and iliac vein encroachment by lumbar pedicle screws: a case-report / K. George, S. Burke, S. Park [et al.] // *Journal of surgical case reports*. – 2020. – Vol. 2020, № 3. – P. rjaa040.
250. Prevalence of lumbar spinal stenosis in general and clinical populations: a systematic review and meta-analysis / R. K. Jensen, T. S. Jensen, B. Koes [et al.] // *European Spine Journal*. – 2020. – Vol 29, № 9. – P. 2143–2163.
251. Primary Pedicle Screw Augmentation in Osteoporotic Lumbar Vertebrae / D. J. Burval, R. F. McLain, R. Milks [et al.] // *Spine*. – 2007. – Vol. 32, № 10. – P.1077–1083.
252. Probing and Tapping: Are We Inserting Pedicle Screws Correctly? / V. Prasad, A. Mesfin, R. Lee [et al.] // *Spine Deformity*. – 2016. – Vol. 4, № 6. – Pages 395–399.
253. Pullout strength after expandable polymethylmethacrylate transpedicular screw augmentation for pedicle screw loosening / S. H. Kang, Y. J. Cho, Y. B. Kim [et al.] // *Journal of Korean Neurosurgery Society*. – 2015. – Vol. 57, № 4. – P. 229–234.
254. Pullout strength for cannulated pedicle screws with bone cement augmentation in severely osteoporotic bone: Influences of radial hole and pilot hole tapping / L. H. Chen, C. L. Tai, P. L. Lai [et al.] // *Clinical Biomechanics*. – 2009. – Vol. 24, № 8. – P. 613–618.

255. Pull-out strength of cemented solid versus fenestrated pedicle screws in osteoporotic vertebrae / C. I. Leichtle, A. Lorenz, S. Rothstock [et al.] // *Bone & Joint Research*. – 2016. – Vol. 5, № 9. – P.419–426.
256. Pullout strength of pedicle screws with cement augmentation in severe osteoporosis: A comparative study between cannulated screws with cement injection and solid screws with cement pre-filling / L. H. Chen, C. L. Tai, D. M. Lee [et al.] // *BMC Musculoskeletal Disorders*. – 2011. – Vol. 12, № 1. – P. 1–11.
257. Quantitative computed tomography of the lumbar spine, not dual x-ray absorptiometry, is an independent predictor of prevalent vertebral fractures in postmenopausal women with osteopenia receiving long-term glucocorticoid and hormone-replacement therapy / Q. Rehman, T. Lang, G. Modin [et al.] // *Arthritis & Rheumatism*. – 2002. – Vol. 46, № 5. – P. 1292–1297.
258. Qureshi, A. Cauda equina syndrome treated by surgical decompression: the influence of timing on surgical outcome / A. Qureshi, P. Sell // *European Spine Journal*. – 2007. – Vol. 16, № 12. – P. 2143–2151.
259. Radiographic analysis of neuroforaminal and central canal decompression following lateral lumbar interbody fusion / B. Zheng, O. P. Leary, D. D. Liu [et al.] // *North American Spine Society Journal (NASSJ)*. – 2022. – Vol. 10. – P. 100110.
260. Radiographic and clinical evaluation of single-level lateral interbody fusion in patients with severe stenosis analyzed using cluster analysis / A. Hiyama, H. Katoh, D. Sakai [et al.]. – DOI 10.1097/MD.00000000000027775 // *Medicine*. – 2021. – Vol. 100, № 47. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8615319/pdf/medi-100-e27775.pdf>. – Дата публикации: 24.11.2021.
261. Radiographic and clinical outcome of lateral lumbar interbody fusion for extreme lumbar spinal stenosis of Schizas grade D: a retrospective study / J. Li, H. Li, N. Zhang [et al.] // *BMC Musculoskeletal Disorders*. – 2020. – Vol. 21, № 1. – P. 1–10.
262. Radiographic and clinical outcomes of anterior and transforaminal lumbar interbody fusions / R. M. Ajiboye, H. Alas, G. M. Mosich [et al.] // *Clinical spine surgery*. – 2018. – Vol. 31, № 4. – P. E230–E238.

263. Radiographic Outcomes of Thoracolumbar AOSpine A3 and A4 Fractures Treated With External Bracing / P. S. Page, V. K. Parmar, E. Bond [et al.]. – DOI 10.7759/cureus.22490 // Cureus. – 2022. – Vol. 14, № 2. – URL: https://assets.cureus.com/uploads/original_article/pdf/85618/20220324-2577-1b01uvv.pdf. – Дата публикации: 22.02.2022.
264. Reduced cement volume does not affect screw stability in augmented pedicle screws / L. Weiser, K. Sellenschloh, K. Püschel [et al.] // European Spine Journal. – 2020. – Vol. 29, № 6. – P. 1297–1303.
265. Reduced loosening rate and loss of correction following posterior stabilization with or without PMMA augmentation of pedicle screws in vertebral fractures in the elderly / A. El. Saman, S. Meier, A. Sander [et al.] // European Journal of Trauma and Emergency Surgery. – 2013. – Vol. 39, № 5. – P. 455–460.
266. Reginster, J.-Y. Osteoporosis: A still increasing prevalence / J. Y. Reginster, N. Burlet // Bone. – 2006. – Vol. 38, № 2. – P. 4–9.
267. Relative Contribution of Various Structures in Chronic Noncompressive Pain Syndromes Associated with Degenerative Diseases of Lumbar Spine / A. Bokov, A. Simonov, A. Kukarin [et al.] // Global Spine Journal. – 2012. – Vol. 2, № 1. – P. s-0032-1319903-s-0032-1319903.
268. Ren, H. Is Short Same-Segment Fixation Really Better than Short-Segment Posterior Fixation in the Treatment of Thoracolumbar Fractures? / H. Ren, J. Wang, J. Jiang // SPINE. – 2018. – Vol. 43, № 21. – P. 1470–1478.
269. Revision characteristics of cement-augmented, cannulated fenestrated pedicle screws in the osteoporotic vertebral body: a biomechanical in vitro investigation / T. R. Blattert, S. Glasmacher, H. J. Riesner [et al.] // Journal of Neurosurgery: Spine. – 2009. – Vol. 11, № 1. – P. 23–27.
270. Revision of cannulated and perforated cement-augmented pedicle screws: a biomechanical study in human cadavers / V. Bullmann, W. Schmoelz, M. Richter [et al.] // Spine. – 2010. – Vol. 35, № 19. – P. E932–E939.
271. Revision pedicle screws with impaction bone grafting: a case series / M. A. Lea, M. Elmalky, S. Sabou [et al.] // Journal of Spine Surgery. – 2021. – Vol. 7, № 3. – P. 344.

272. Revision surgery of the lumbar spine: anterior lumbar interbody fusion followed by percutaneous pedicle screw fixation / S. H. Lee, B. U. Kang, S. H. Jeon [et al.] // *Journal of Neurosurgery: Spine*. – 2006. – Vol. 5, № 3. – P. 228–233.
273. Risk of cement leakage and pulmonary embolism by bone cement-augmented pedicle screw fixation of the thoracolumbar spine / I. Janssen, Y. M. Ryang, J. Gempt [et al.] // *The Spine Journal*. – 2017. – Vol. 17, № 6. – P. 837–844.
274. Rohlmann, A. Loads on an internal spinal fixation device during walking / A. Rohlmann, G. Bergmann, F. Graichen // *Journal of Biomechanics*. – 1997. – Vol. 30, № 1. – P.41–47.
275. Salvage of lumbar pseudarthrosis with customized large-diameter pedicle screws: report of two cases / R. C. Huang, D. S. Meredith, C. K. Kepler [et al.] // *Spine*. – 2011. – Vol. 36, № 22. – P. E1489–E1492.
276. Samuel, A. M. Treatment for Degenerative Lumbar Spondylolisthesis: Current Concepts and New Evidence / A. M. Samuel, H. G. Moore, M. E. Cunningham // *Current reviews in musculoskeletal medicine*. – 2017. – Vol. 10, № 4. – P. 521–529.
277. Schermann, H. Delayed penetration of the thoracic aorta by pedicle screws: a case report of screws left as-is / H. Schermann, Y. Mirovsky, Y. Chechik // *Spine*. – 2019. – Vol. 44, № 19. – P. E1169–E1171.
278. Schnake, K. J. Five-year clinical and radiological results of combined anteroposterior stabilization of thoracolumbar fractures / K. J. Schnake, S. I. Stavridis, F. Kandziora // *Journal of Neurosurgery: Spine*. – 2014. – Vol. 20, № 5. – P. 497–504.
279. Schönström, N. Imaging lumbar spinal stenosis / N. Schönström, J. Willén // *Radiologic Clinics*. – 2001. – Vol. 39, № 1. – P. 31-53.
280. Schroeder, G.D. Thoracolumbar Trauma Classification / G. D. Schroeder, J. S. Harrop, A. R. Vaccaro // *Neurosurgery Clinics of North America*. – 2017. – Vol. 28, № 1. – P. 23–29.
281. Scientific Advisory Board of the European Society for Clinical and Economic Aspects of Osteoporosis and Osteoarthritis (ESCEO) and the Committee of Scientific Advisors of the International Osteoporosis Foundation (IOF). European guidance for the

- diagnosis and management of osteoporosis in postmenopausal women / J. A. Kanis, E. V. McCloskey, H. Johansson [et al.] // *Osteoporos Int.* – 2013. – T. 24, № 1. – P. 23–57.
282. Screw-related complications after instrumentation of the osteoporotic spine: a systematic literature review with meta-analysis / E. Rometsch, M. Spruit, J. E. Zigler [et al.] // *Global spine journal.* – 2020. – Vol. 10, № 1. – P. 69–88.
283. Sembrano, J. N. SOLAS Degenerative Study Group two-year comparative outcomes of mis lateral and mis transforaminal interbody fusion in the treatment of degenerative spondylolisthesis: part I: clinical findings / J. N. Sembrano, A. Tohmeh, R. Isaacs // *Spine (Phila Pa 1976).* – 2016. – Vol. 41, № Suppl 8. – P. S123–132.
284. Shiban E. Low-Grade Infection and Implant Failure Following Spinal Instrumentation: A Prospective Comparative Study / E. Shiban, A. K. Joerger, I. Janssen [et al.] // *Neurosurgery.* – 2020. – Vol. 87, № 2. – P. 426–426.
285. Short-Segment Fixation of Lumbar Burst Fractures Using Pedicle Fixation at the Level of the Fracture / A. Mahar, C. Kim, M. Wedemeyer [et al.] // *Spine.* – 2007. – Vol. 32, № 14. – P. 1503–1507.
286. Sileshi, G. W. A critique of current trends in the statistical analysis of seed germination and viability data / G. W. Sileshi // *Seed Science Research.* – 2012. – Vol. 22, № 3. – P. 145–159.
287. Silva, B. C. Trabecular bone score: perspectives of an imaging technology coming of age / B. C. Silva, J. P. Bilezikian // *Arquivos Brasileiros de Endocrinologia & Metabologia.* – 2014. – Vol. 58. – P. 493–503.
288. Simultaneous screening for osteoporosis at CT colonography: bone mineral density assessment using MDCT attenuation techniques compared with the DXA reference standard / P. J. Pickhardt, L. J. Lee, A. Muñoz del Rio [et al.] // *Journal of Bone and Mineral Research.* – 2011. – Vol. 26, № 9. – P. 2194–2203.
289. Single level lumbar laminectomy alters segmental biomechanical behavior without affecting adjacent segments / A. Bisschop, S. J. P. M. van Engelen, I. Kingma [et al.] // *Clinical Biomechanics.* – 2014. – Vol. 29, № 8. – P. 912–917.

290. Small, R. E. Uses and limitations of bone mineral density measurements in the management of osteoporosis / R. E. Small // *Medscape General Medicine*. – 2005. – Vol. 7, № 2. – P. 3.
291. Solomou, G. Radiation Exposure in Bone Densitometry / G. Solomou, J. Damilakis // *Seminars in musculoskeletal radiology*. – 2016. – Vol. 20, № 04. – P. 392–398.
292. State of the art in osteoporosis risk assessment and treatment / J. Liu, E. M. Curtis, C. Cooper [et al.] // *Journal of Endocrinological Investigation*. – 2019. – Vol. 42, № 10. – P. 1149–1164.
293. Sun, K. A case report of intracardiac bone cement embolization after posterior decompression and cement-enhanced pedicle screw fixation for osteoporosis and lumbar degeneration / K. Sun, F. Huang, B. Liang. – DOI 10.1097/MD.00000000000028826 // *Medicine*. – 2022. – Vol. 101, № 8. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8878710/pdf/medi-101-e28826.pdf>. – Дата публикации: 25.02.2022.
294. Surgical Techniques for Thoracolumbar Spine Fractures: WFNS Spine Committee Recommendations / S. Sharif, Y. Shaikh, O. Yaman [et al.] // *Neurospine*. – 2021. – Vol. 18, № 4. – P. 667.
295. Surgical treatment of osteoporotic thoraco-lumbar compressive fractures: the use of pedicle screw with augmentation PMMA / M. Girardo, P. Cinnella, G. Gargiulo [et al.] // *European Spine Journal*. – 2017. – Vol. 26, № 4. – P. 546–551.
296. Surgical treatment of the osteoporotic spine with bone cement-injectable cannulated pedicle screw fixation: technical description and preliminary application in 43 patients / F. Dai, Y. Liu, F. Zhang [et al.] // *Clinics*. – 2015. – Vol. 70, № 2. – P. 114–119.
297. Surgical Trend Analysis for Use of Cement Augmented Pedicle Screws in Osteoporosis of Spine: A Systematic Review (2000-2017) / V. Singh, R. Mahajan, K. Das [et al.] // *Global Spine Journal*. – 2019. – Vol. 9, № 7. – P.783–795.
298. Technical Note: Pedicle Cement Augmentation with Proximal Screw Toggle and Loosening / W. J. Choy, W. R. Walsh, K. Phan [et al.] // *Orthopaedic Surgery*. – 2019. – Vol. 11, № 3. – P. 510–515.

299. Tezeren, G. Posterior fixation of thoracolumbar burst fracture short-segment pedicle fixation versus long-segment instrumentation / G. Tezeren, I. Kuru // *Clinical Spine Surgery*. – 2005. – Vol. 18, № 6. – P. 485–488.
300. The cement leakage in cement-augmented pedicle screw instrumentation in degenerative lumbosacral diseases: a retrospective analysis of 202 cases and 950 augmented pedicle screws / H. Guo, Y. Tang, D. Guo [et al.] // *European Spine Journal*. – 2019. – Vol. 28, № 7. – P. 1661–1669.
301. The diagnosis of osteoporosis / J. A. Kanis, L. J. Melton, C. Christiansen [et al.] // *Journal of bone and mineral research*. – 1994. – Vol. 9, № 8. – P. 1137–1141.
302. The diagnostic accuracy of imaging modalities to detect pseudarthrosis after spinal fusion—a systematic review and meta-analysis of the literature / M. J. M. Peters, C. H. G. Bastiaenen, B. T. Brans [et al.] // *Skeletal Radiology*. – 2019. – Vol. 48, № 10. – P. 1499–1510.
303. The Effect and Safety of Polymethylmethacrylate-Augmented Sacral Pedicle Screws Applied in Osteoporotic Spine with Lumbosacral Degenerative Disease: A 2-Year Follow-up of 25 Patients / H. Z. Guo, Y. C. Tang, Y. X. Li [et al.] // *World Neurosurgery*. – 2019. – Vol. 121. – P. e404–e410.
304. The effect of application time of two types of bone cement on the cement–bone interface strength / Z. Dahabreh, H. K. Phillips, T. Stewart [et al.] // *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology*. – 2015. – Vol. 25, № 4. – P. 775–781.
305. The Effect of Pilot Hole Size on the Insertion Torque and Pullout Strength of Self-Tapping Cortical Bone Screws in Osteoporotic Bone / S. Battula, A. J. Schoenfeld, V. Sahai [et al.] // *The Journal of Trauma: Injury, Infection, and Critical Care*. – 2008. – Vol. 64, № 4. – P. 990–995.
306. The Effect of Repetitive Pilot-Hole Use on the Insertion Torque and Pullout Strength of Vertebral System Screws / H. L. A. Defino, R. C. Rosa, P. Silva [et al.] // *Spine*. – 2009. – Vol. 34, № 9. – P. 871–876.
307. The Effects of Spinopelvic Parameters and Paraspinal Muscle Degeneration on S1 Screw Loosening / J. B. Kim, S. W. Park, Y. S. Lee [et al.] // *Journal of Korean Neurosurgical Society*. – 2015. – Vol. 58, № 4. – P. 357–362.

308. The efficacy and safety of anterior versus posterior approach for the treatment of thoracolumbar burst fractures: a systematic review and meta-analysis / T. Wang, Z. Wang, P. Ji [et al.]. – DOI 10.21037/atm-22-903 // *Annals of Translational Medicine*. – 2022. – Vol. 10, № 6. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9011281/pdf/atm-10-06-309.pdf>. – Дата публикации: 12.03.2022.
309. The Evaluation of Indirect Neural Decompression After Lateral Lumbar Interbody Fusion Using Intraoperative Computed Tomography Myelogram / S. Hayama, A. Nakano, Y. Nakaya [et al.] // *World Neurosurgery*. – 2018. – Vol. 120. – P. e710–e718.
310. The fates of pedicle screws and functional outcomes in a geriatric population following polymethylmethacrylate augmentation fixation for the osteoporotic thoracolumbar and lumbar burst fractures with mean ninety five month follow-up / H. H. Lin, M. C. Chang, S. T. Wang [et al.] // *International Orthopaedics*. – 2018. – Vol. 42, № 6. – P. 1313–1320.
311. The importance of loading the periphery of the vertebral endplate / J. Cadman, C. Sutterlin III, D. Dabirrahmani [et al.] // *Journal of Spine Surgery*. – 2016. – Vol. 2, № 3. – P. 178.
312. The insertional torque of a pedicle screw has a positive correlation with bone mineral density in posterior lumbar pedicle screw fixation / J. H. Lee, J.-H. Lee, J. W. Park [et al.] // *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume*. – 2012. – Vol. 94-B, № 1. – P. 93–97.
313. The Potential Impact of Venobasillar System Morphology and Applied Technique on Epidural Cement Leakage with Percutaneous Vertebroplasty / A. Bokov, S. Mlyavykh, A. Aleynik [et al.] // *Pain physician*. – 2016. – Vol. 19, № 6. – P. 357–362.
314. The significance of radiolucent zones surrounding pedicle screws. Definition of screw loosening in spinal instrumentation / B. Sandén, C. Olerud, M. Petré-Mallmin [et al.] // *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume*. – 2004. – Vol. 86, № 3. – P. 457–461.

315. The surgical algorithm for the AOSpine thoracolumbar spine injury classification system / A. R. Vaccaro, G. D. Schroeder, C. K. Kepler [et al.] // *European Spine Journal*. – 2016. – Vol. 25, № 4. – P. 1087–1094.
316. Thoracolumbar burst fractures associated with incomplete neurological deficit in patients under the age of 40: Is the posterior approach enough? Surgical treatment and results in a case series of 10 patients with a minimum follow-up of 2 years / L. Piccone, V. Cipolloni, L. A. Nasto [et al.] // *Injury*. – 2020. – Vol. 51, № 2. – P. 312–316.
317. Thoracolumbar burst fractures in patients with neurological deficit: Anterior approach versus posterior percutaneous fixation with laminotomy / S. R. Shin, S. S. Lee, J. H. Kim [et al.] // *Journal of Clinical Neuroscience*. – 2020. – Vol. 75. – P. 11–18.
318. Thoracolumbar Burst Fractures: A Systematic Review and Meta-Analysis on the Anterior and Posterior Approaches / A. Roblesgil-Medrano, E. Tellez-Garcia, L. C. Bueno-Gutierrez [et al.]. – DOI 10.22603/ssrr.2021-0122 // *Spine Surgery and Related Research*. – 2021. – URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/ssrr/advpub/0/advpub_2021-0122/_pdf/-char/ja. – Дата публикации: 22.02.2021.
319. Thoracolumbar burst fractures: A systematic review and meta-analysis comparing posterior-only instrumentation versus combined anterior-posterior instrumentation / H. Hughes, A. Mc. Carthy, G. A. Sheridan [et al.] // *Spine*. – 2021. – Vol. 46, № 15. – P. E840–E849.
320. Thoracolumbar fractures: Three column stabilization through posterior only approach / D. K. Singh, N. Singh, R. Kumar [et al.] // *Interdisciplinary Neurosurgery*. – 2016. – Vol. 4. – P. 1–5.
321. Time to augment?! Impact of cement augmentation on pedicle screw fixation strength depending on bone mineral density / L. Weiser, G. Huber, K. Sellenschloh [et al.] // *European Spine Journal*. – 2018. – Vol. 27, № 8. – P. 1964–1971.
322. Tissue engineered bone using select growth factors: A comprehensive review of animal studies and clinical translation studies in man / D. Gothard, E. L. Smith, J. M. Kanczler [et al.] // *European Cells and Materials*. – 2014. – Vol. 28. – P. 166–208.

323. Trabecular bone score (TBS) as a new complementary approach for osteoporosis evaluation in clinical practice / N. C. Harvey, C. C. Glüer, N. Binkley [et al.] // *Bone*. – 2015. – Vol. 78. – P. 216–224.
324. Treatment of Fractures of the Thoracolumbar Spine: Recommendations of the Spine Section of the German Society for Orthopaedics and Trauma (DGOU) / A. P. Verheyden, U. J. Spiegl, H. Ekkerlein [et al.] // *Global Spine Journal*. – 2018. – Vol. 8, № 2. – P. 34S-45S.
325. Treatment of unstable thoracolumbar junction fractures: short-segment pedicle fixation with inclusion of the fracture level versus long-segment instrumentation / M. Dobran, D. Nasi, D. Brunozzi [et al.] // *Acta Neurochirurgica*. – 2016. – Vol. 158, № 10. – P. 1883–1889.
326. Unplanned second-stage decompression for neurological deterioration caused by central canal stenosis after indirect lumbar decompression surgery / H. Nakashima, T. Kanemura, K. Satake [et al.] // *Asian spine journal*. – 2019. – Vol. 13, № 4. – P. 584.
327. Usefulness of oblique lateral interbody fusion at L5–S1 level compared to transforaminal lumbar interbody fusion / H. Y. Mun, M. J. Ko, Y. B. Kim [et al.] // *Journal of Korean Neurosurgical Society*. – 2020. – Vol. 63, № 6. – P. 723.
328. Varghese, V. Comparison of pullout strength of pedicle screws following revision using larger diameter screws / V. Varghese, V. Krishnan, G. S. Kumar // *Medical engineering & physics*. – 2019. – Vol. 74. – P. 180–185.
329. Venous Drainage of Lumbar Vertebral Bodies: Anatomic Study with Application to Kyphoplasty, Vertebroplasty, and Pedicle Screw Complications / J. Iwanaga, T. Rustagi, B. Ishak [et al.] // *World Neurosurgery*. – 2020. – Vol. 137 – P. e286–e290.
330. Vertebral body Hounsfield units are associated with cage subsidence after transforaminal lumbar interbody fusion with unilateral pedicle screw fixation / J. Mi, K. Li, X. Zhao [et al.] // *Clinical spine surgery*. – 2017. – Vol. 30, № 8. – P. E1130–E1136.
331. Vijayakumar, R. Osteoporosis: An under-recognized public health problem / R. Vijayakumar, D. Büsselberg // *Journal of Local and Global Health Science*. – 2016. – Vol. 2016, № 1. – P. 2.

332. Viswanathan, V. K. Management of thoracolumbar fractures in adults: Current algorithm. / V. K. Viswanathan, R. M. Kanna. – DOI 10.13107/ij.s.2019.v04i02.004 // International Journal of Spine. – 2019. – Vol. 4, № 2. – URL: http://ijsonline.co.in/wp-content/uploads/2020/08/3-Dr.-Vibhu-TL-fracture_IJS-2019.pdf. – Дата публикации: 14.06.2019.
333. Vokes, T. J. Using clinical risk factors and bone mineral density to determine who among patients undergoing bone densitometry should have vertebral fracture assessment / T. J. Vokes, D. L. Gillen // Osteoporosis international. – 2010. – Vol. 21, № 12. – P. 2083–2091.
334. Winder, M. J. Comparison of ALIF vs. XLIF for L4/5 interbody fusion: pros, cons, and literature review / M. J. Winder, S. Gambhir // Journal of Spine Surgery. – 2016. – Vol. 2, № 1. – P. 2.
335. Woisetschläger, M. Model for improved correlation of BMD values between abdominal routine Dual energy CT data and DXA scans / M. Woisetschläger, A. Spångeus // European Journal of Radiology. – 2018. – Vol. 99. – P. 76–81.
336. Zaidi, Q. Measurement Techniques and Utility of Hounsfield Unit Values for Assessment of Bone Quality Prior to Spinal Instrumentation / Q. Zaidi, O. A. Danisa, W. Cheng // SPINE. – 2019. – Vol. 44, № 4. – P. E239–E244.
337. Zhang, Z. Monte Carlo based statistical power analysis for mediation models: methods and software / Z. Zhang // Behavior Research Methods. – 2014. – Vol. 46, № 4. – P. 1184–1198.
338. Zileli, M. Incidence and epidemiology of thoracolumbar spine fractures: WFNS Spine Committee recommendations / M. Zileli, S. Sharif, M. Fornari // Neurospine. – 2021. – Vol. 18, № 4. – P. 704.