

Ukr Neurosurg J. 2021;27(2):56-64  
doi: 10.25305/unj.228926

## Хірургічне лікування травматичного незвідного спондилоптозу грудо-поперекового переходу

Нехлопочин О.С.<sup>1</sup>, Вербов В.В.<sup>2</sup>, Чешук Є.В.<sup>2,3</sup>, Вороді М.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Відділення патології спинного мозку та хребта, Інститут нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова НАМН України, Київ, Україна

<sup>2</sup>Відділення відновлювальної нейрохірургії, Інститут нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова НАМН України, Київ, Україна

<sup>3</sup> Кафедра нейрохірургії, Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, Київ, Україна

Надійшла до редакції 12.04.2021

Прийнята до публікації 21.05.2021

### Адреса для листування:

Нехлопочин Олексій Сергійович,  
Відділення патології спинного мозку та хребта, Інститут нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова, вул. Платона Майбороди, 32, Київ, Україна, 04050, e-mail: AlexeyNS@gmail.com

Грудо-поперековий перехід є найчастішим місцем локалізації травматичних ушкоджень хребта. На нього припадає 50–60% від усіх травм грудного і поперекового відділів. Одним із досить рідкісних, але найтяжчих видів травматичного ушкодження є спондилоптоз, який супроводжується грубим порушенням осі хребта в одній або декількох площинах. Залежно від можливості інтраопераційного відновлення осі хребта без резекції тіла ушкодженого хребця виділяють два типи травматичного спондилоптозу: який вправляється і який не вправляється.

**Мета:** визначити оптимальну техніку хірургічної корекції травматичного незвідного спондилоптозу грудо-поперекового переходу.

**Матеріали і методи.** Проведено ретроспективний аналіз бази даних пацієнтів, які перебували на лікуванні в Інституті нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова НАМН України в період з 2017 до 2020 рр., для виявлення постраждалих з травматичним незвідним спондилоптозом грудо-поперекового переходу.

**Результати.** Проаналізовано результати лікування 5 пацієнтів віком від 18 до 52 років (середній вік – 31,2 року). Мінімальний термін з моменту травми до виконання хірургічного втручання становив 14 днів, максимальний – 3 міс 2 дні (в середньому – 42,2 дня). На момент госпіталізації в усіх пацієнтів зареєстровано неврологічний дефіцит, який відповідає функціональному класу А за шкалою тяжкості травми спинного мозку ASIA (American spine injury association). Оцінка за шкалою TLICS (Thoracolumbar injury classification and severity) становила 8 балів. У всіх випадках зміщення класифіковано як латеральний спондилоптоз: у трьох пацієнтів – як ізольоване зміщення лише в коронарній площині, у двох – як комбіноване (в коронарній та сагітальній площині). Хірургічне втручання в усіх випадках виконували із заднього доступу. Як тілозамінну систему в 2 пацієнтів використали вертикальний циліндричний сітчастий імплантат (Mesh), у 3 – телескопічний імплантат. Застосовували метод бікорткальної імплантації транспедикюлярних гвинтів. Транспедикюлярну систему зміцнювали двома поперечними стяжками типу rod-to-rod. У всіх випадках досягнуто відновлення осі хребта як у коронарній, так і в сагітальній площині. Контрольні огляди проведено через 2, 6 та 12–18 міс після операції. Регрес неврологічних порушень зареєстровано у двох пацієнтів: в одного – до ASIA B, у другого – до ASIA C.

**Висновки.** Ізольований задній доступ при хірургічному лікуванні травматичного незвідного спондилоптозу грудо-поперекового переходу продемонстрував високу ефективність як щодо відновлення осі хребта, так і щодо забезпечення стабільності спондилодезу.

**Ключові слова:** грудо-поперековий перехід; незвідний спондилоптоз; ізольований задній доступ

### Вступ

У клінічній практиці ділянку грудного і поперекового відділів хребта прийнято поділяти на безпосередньо грудний відділ (Th1–Th10), грудо-поперековий перехід (Th10–L2) і поперековий відділ (L3–L5). Грудний відділ хребта характеризується високою механічною ригідністю, яка зумовлена наявністю «корсета» грудної клітки, орієнтацією фасеткових суглобів у коронарній площині та відносно тонкими міжхребцевими дисками. Досить вузький хребтовий

канал часто призводить до ураження спинного мозку при травматичному остеолігаментозному ушкодженні цієї зони [1]. Поперековий відділ хребта характеризується більшою гнучкістю через сагітальну орієнтацію фасеткових суглобів і більшу висоту міжхребцевих дисків. Відносно менша частота неврологічних ушкоджень при переломах поперекового відділу пов'язана з великим розміром хребтового каналу та більшою стійкістю нервових корінців кінського хвоста до травматичного впливу. Грудо-поперековий перехід розта-



шований між жорстким грудним відділом хребта та рухомих поперекових відділом, що зумовлює значне біомеханічне навантаження цієї ділянки [2].

При аналізі частоти розподілу механічних ушкоджень грудно-поперекового відділу відзначено, що близько 50–60% випадків припадають на зону грудно-поперекового переходу, 25–40% – на грудний відділ хребта, 10–14% – на поперековий відділ та крижі [3]. Частота і ступінь неврологічних розладів при травмі грудно-поперекового переходу значною мірою визначаються характером ушкодження (22–51%). За даними С. Кпор і співавт., при типі А ушкоджень за класифікацією AO Spine неврологічної дисфункції виявлено у 22% випадків, при типі В – у 28%, при типі С – у 51% [4].

Одним з досить рідкісних, але найтяжчих видів травматичного ушкодження грудно-поперекового переходу є спондилоптоз (СП), який супроводжується грубим порушенням осі хребта в одній або декількох площинах і ураженням усіх опорних колон. Залежно від можливості інтраопераційного відновлення осі хребта без резекції тіла (тіл) ушкоджених хребців виділяють два типи травматичного СП: який вправляється і який не вправляється. Запропоновано велику кількість методик відкритого вправлення травматичних зсувів хребців як у ділянці грудно-поперекового переходу, так і всього грудно-поперекового відділу хребта. Однак хірургічна тактика травматичного СП за неможливості або недоцільності відкритого вправлення через масивне ушкодження тіл хребців, залишається практично не висвітленою.

**Мета:** визначити оптимальну техніку хірургічної корекції травматичного незвідного спондилоптозу грудно-поперекового переходу.

## Матеріали і методи

### Учасники дослідження

Проведено ретроспективний аналіз бази даних пацієнтів, які перебували на стаціонарному лікуванні в Інституті нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова НАМН України в період з 2017 до 2020 рр. для виявлення постраждалих з травматичним СП грудно-поперекового переходу.

Від усіх пацієнтів отримано інформовану згоду на обробку результатів лікування за умов дотримання конфіденційності та публікацію узагальнених результатів. Проведення дослідження затверджене Комісією з етики та біоетики Інституту нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова НАМН України (протокол №4 від 05.09.2018 р). Робота є фрагментом науково-дослідної роботи (номер держреєстрації 0119U000110).

### Критерії залучення

У дослідження залучено хворих з травматичним ушкодженням ділянки Th11–L2, яке характеризувалося повним зміщенням хребця щодо нижче розташованого, повним порушенням конгруентності замикальних пластин, дислокацією зміщеного хребця каудально більше ніж на 50% висоти тіла і наявності ознаки «подвійного хребця» на аксіальних зрізах спіральних комп'ютерних томограм [5]. Обов'язковою умовою залучення в дослідження була наявність результатів доопераційних і післяопераційних магнітно-резонансної (МРТ) та/або спіральної комп'ютерної

томографії (СКТ) і принаймні двох контрольних оглядів у післяопераційний період.

### Дизайн дослідження

Дослідження ретроспективне обсерваційне.

Оцінку рівня неврологічних розладів проводили відповідно до критеріїв American Spinal Injury Association (ASIA) [6]. Тяжкість ушкодження характеризували із застосуванням шкали Thoracolumbar injury classification and severity (TLICS) [7]. Характер ушкодження тіл хребців оцінювали за AOSpine Thoracolumbar Spine Injury Classification System (TLSICS) [8]. При аналізі даних спондилографії, МРТ і СКТ застосовано програмне забезпечення Onis 2.5 Free Edition (DigitalCore, Co. Ltd).

### Статистичний аналіз

Статистичну обробку отриманих цифрових показників не проводили через малу клінічну групу. Основним завданням було виявити загальні закономірності для визначення напрямку подальших деталізованих досліджень.

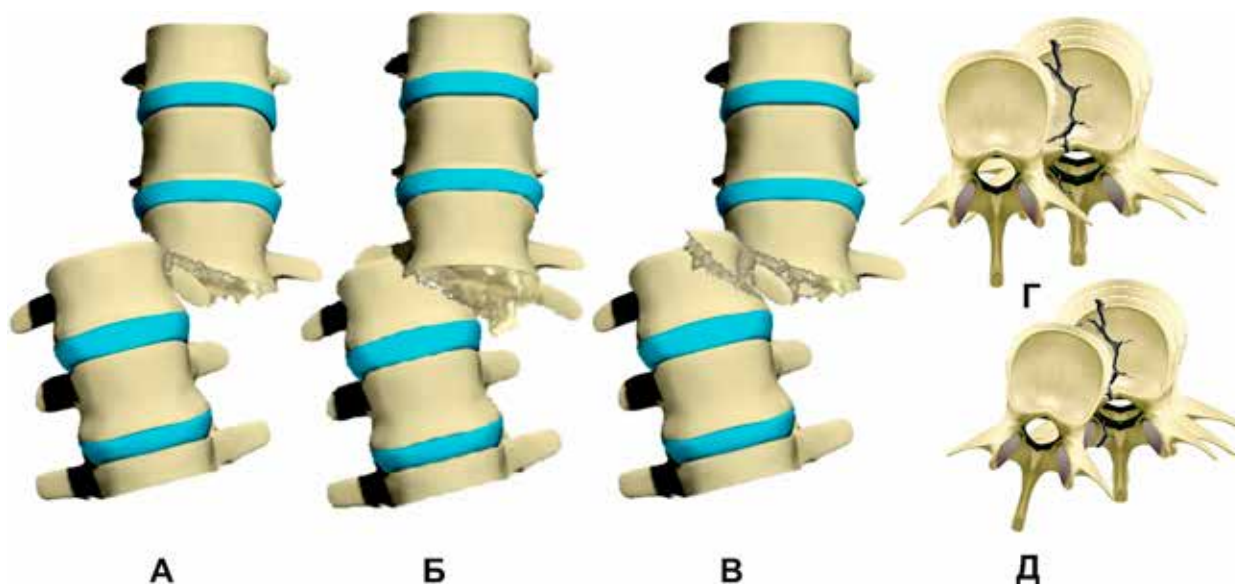
### Результати та їх обговорення

За аналізований період виявлено 5 пацієнтів віком від 18 до 52 років (середній вік – 31,2 року), які відповідали критеріям залучення в дослідження. Причиною травми в 3 випадках була дорожньо-транспортна пригода, в 2 – падіння з висоти. У 2 постраждалих діагностовано торакальну травму, котра супроводжувалася переломом ребер і гемотораксом, у 2 – абдомінальну травму, у 3 – перелом кінцівок, у 2 – черепно-мозкову травму.

У зв'язку з тяжкістю політравми в усіх випадках пацієнти були переведені в Інститут нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова НАМН України після стабілізації вітальних функцій. Мінімальний термін з моменту травми до виконання хірургічного втручання становив 14 днів, максимальний – 3 міс 2 дні (в середньому – 42,2 дня). На момент госпіталізації в усіх пацієнтів зареєстровано неврологічний дефіцит ASIA A. В доопераційний період усім постраждалим виконано МРТ для оцінки ступеня ушкодження невральних структур та заперечення інтрадурально розташованих гематом і СКТ – для адекватної оцінки ступеня та характеру ушкодження, а також для вибору техніки хірургічного втручання.

Оцінка за шкалою TLICS у всіх випадках становила 8 балів (3 бали – морфологія ушкодження, 3 бали – характеристика заднього лігаментозного комплексу, 2 бали – рівень неврологічних розладів).

Морфологія травмованого хребетно-рухового сегмента (ХРС) характеризувалася в 3 випадках переломом тіла краніально розташованого (зміщеного хребця) (**Рис. 1А**), в 1 – каудально розташованого хребця (**Рис. 1Б**), ще в 1 – переломом тіл обох хребців одночасно (**Рис. 1В**). У 2 із 3 випадків переломів зміщеного хребця виявлено ушкодження тіла суміжного краніального хребця. В усіх аналізованих випадках дислокацію класифіковано як латеральний СП: у трьох пацієнтів – як ізольоване зміщення лише в коронарній площині (**Рис. 1Г**), у двох – як комбіноване (в коронарній і сагітальній площині), але з переважанням бічного зсуву (**Рис. 1Д**). Ротаційний компонент дислокації становив 10, 18 і 25°, у 2 випадках був відсутній. Найбільшу ротацію відзначено при зміщенні одночасно в двох площинах (**Табл. 1**).



**Рис. 1.** Морфологічні варіанти спондилоптозу (схематично): латероспондилоптоз з ушкодженням краніального хребця (А), каудального (Б), обох хребців травмованого хребетно-рухового сегмента (В). Варіанти ротаційної деформації: латеральний спондилоптоз без ротаційного компонента (Г), латеро-ретроспондилоптоз із ротацією

**Таблиця 1.** Морфологічна характеристика ушкоджень

Номер пацієнта	СП	Тип СП	Краніальний хребець	Каудальний хребець	Додаткове ушкодження	РД, °	СД, °	ФД, °
1	Th12-L1	Латеральний	A4	N	Th11: A1	0	14	10
2	L1-L2	Латеральний	A3	N	Th12: A1	0	26	8
3	L1-L2	Латеро-антеспондилоптоз	N	A3	-	25	15	22
4	Th11-Th12	Латеро-ретроспондилоптоз	A2	N	-	18	43	16
5	Th12-L1	Латеральний	A3	A4	-	10	34	11

*Примітка:* РД – ротаційна деформація; СД – деформація в сагітальній площині; ФД – деформація у фронтальній площині; N – відсутність верифікованих ушкоджень тіла хребця.

Хірургічне втручання в усіх випадках виконували із заднього доступу в положенні пацієнта на животі на рамі Вілсона з можливістю інтраопераційної корекції висоти опори. Обсяг ламінектомії визначався ступенем ушкодження заднього опорного комплексу, компресією хребтового каналу і передбачуваним обсягом вертебректомії. У 3 випадках виконано ламінектомію двох хребців, у 2 – трьох хребців. Інтраопераційно встановлено ушкодження твердої мозкової оболонки (ТМО) з явищами ліквореї в 2 випадках, відрив корінців – у 2, ушкодження муфти корінця з частковим збереженням волокон – в 1. В одного пацієнта не виявлено ушкодження оболонки спинного мозку і корінців. Розтин ТМО та ревізію субдурального простору виконано у двох пацієнтів (передбачено на етапі планування на підставі даних МРТ). У всіх випадках дефекти ТМО ушиті із додатковою герметизацією фібриновим клеєм. Обсяг вертебректомії визначався кількістю ушкоджених тіл хребців. Повністю видалили ушкоджені тіла та всі кісткові уламки, що було обов'язковою умовою повноцінного і адекватного відновлення осі ушкодженого хребта і

коректної установки міжтілової опори. Як тілозамінну систему в 2 пацієнтів використали вертикальний циліндричний сітчастий імплантат (Mesh), у 3 – телескопічний імплантат (в одному випадку з лордозними накладками). Установку транспедикулярних гвинтів в 2 випадках при використанні Mesh виконали до імплантації тілозамінної опори з метою додаткової distraкції сегмента. В усіх випадках застосовували метод бікорткальної імплантації транспедикулярних гвинтів. З огляду на повну дестабілізацію сегмента корекцію сагітального профілю проводили дозовано для запобігання формуванню значної невідповідності площини замикальних пластин хребців і торцевих елементів міжтілової опори (в 4 випадках). У одного пацієнта вдалося досягти повного відновлення сагітального профілю за рахунок наявності лордозних накладок на тілозамінному імплантаті. В усіх випадках транспедикулярну систему зміцнювали двома поперечними стяжками типу rod-to-rod. Двом пацієнтам встановлено епідуральні електроди і приймальну антену системи електронейростимуляції. У разі виконання ламінектомії двох хребців на завершаль-

ному етапі хірургічного втручання уклали кісткову стружку із попередньою декортикацією ділянок дуг суміжних хребців для формування кісткового спондилодезу. В усіх випадках рани вшивали наглухо без дренажу. Загальний об'єм крововтрати в жодному з аналізованих випадків не перевищив 800 мл.

На 3–7-й день післяопераційного періоду пацієнтам виконано СКТ. Застосована техніка хірургічного втручання дала змогу в усіх випадках досягти повного відновлення осі хребта як в коронарній, так і в сагітальній площині. Максимальна кутова деформація оперованого ХРС у коронарній площині не перевищила 3°. Відзначено, що при застосуванні тілозамінної опори типу Mesh максимальне відхилення осі імплантату від осі хребта в коронарній площині становило 6°, у сагітальній площині – 7°, при використанні телескопічних імплантатів – 2 і 4° відповідно.

Середня тривалість післяопераційного перебування в стаціонарі становила 11,6 дня. Тривалість переважно залежала від проведення початкового етапу нейрореабілітації. Ні в ранній, ні у віддалений післяопераційний період гнійно-запальних ускладнень не зареєстровано.

Подальший контроль спроможності спондилодезу проведено на підставі даних рентгенографії в двох стандартних проекціях через 1,5–2,5 міс після операції у 5 пацієнтів, через 5,5–7,5 міс – у 3, через 12–18 міс – у 4. Мінімальний термін спостереження після хірургічного втручання становив 6 міс, максимальний – 2,5 року. Регрес неврологічних порушень зареєстрований у двох пацієнтів: в одного – до ASIA B, у другого – до ASIA C.

#### Клінічний випадок

Пацієнтка Б., 21 рік, госпіталізована в Інститут нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова НАМН України у зв'язку з грубим травматичним ушкодженням грудо-поперекового переходу. Травму отримала в дорожньо-транспортній пригоді як пішохід. Протягом 3 міс перебувала на лікуванні в багатoproфільній лікарні, після стабілізації вітальних функцій переведена для виконання реконструктивно-стабілізуючого хірургічного втручання. На момент переведення неврологічний дефіцит відповідав ASIA A. За даними СКТ виявлено ушкодження TLSICS типу С у сегменті

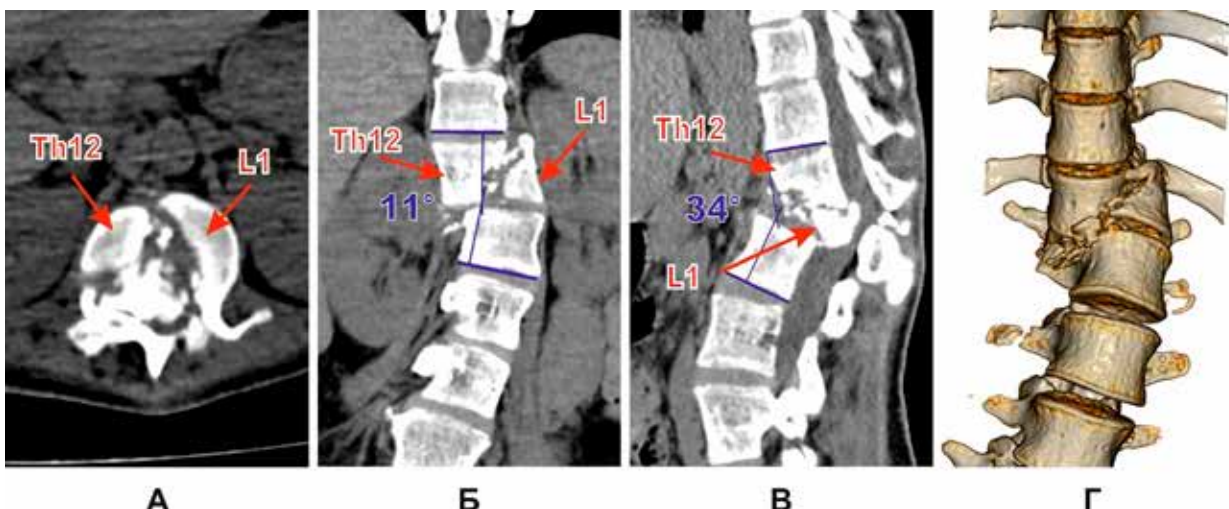


**Рис. 3.** Етап хірургічного втручання після виконання ламінектомії хребців Th12 і L1, корпектомії хребців Th12 та L1 і корекції осі хребта перед установленням тілозамінного імплантату

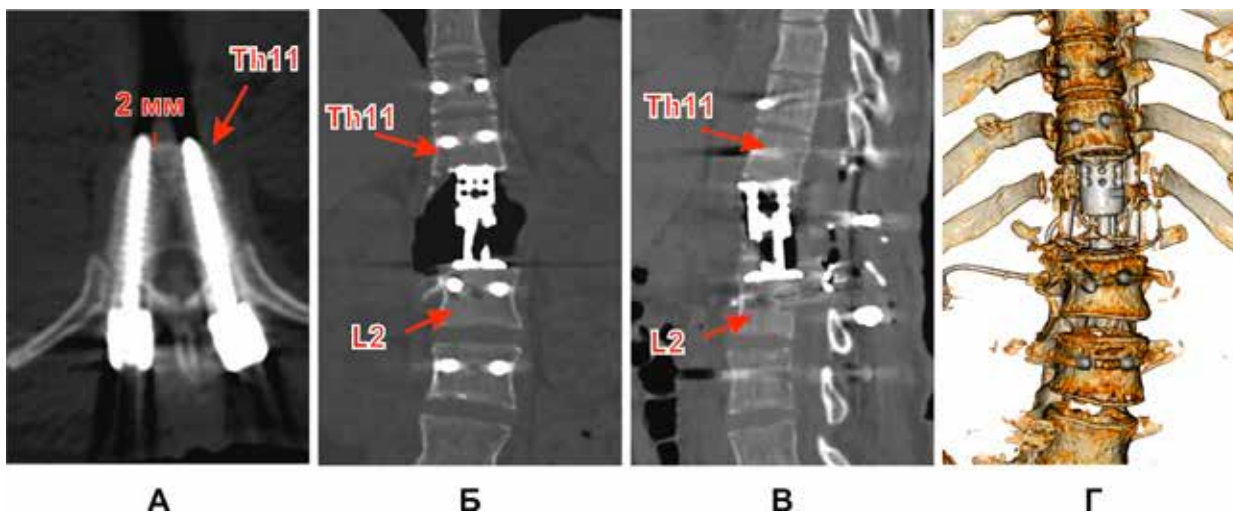
Th12-L1 із переломом хребця Th12 типу A3 і хребця L1 типу A4 (**Рис. 2**). З огляду на відсутність опорної функції залишків тіла L1 і неможливість установки протеза тіла хребця з опорою на ушкоджений Th12 прийнято рішення про виконання вертебректомії хребців Th12 і L1 із заміщенням тіл телескопічним тілозамінним імплантатом.

Із заднього доступу виконано ламінектомію Th12 та L1 з тотальною вертебректомією Th12 і L1 та видаленням усіх кісткових уламків (**Рис. 3**). Після відновлення осі хребта шляхом зміни висоти опори рами Вілсона встановлено телескопічний тілозамінний імплантат.

Виконано задній транспедикулярний спондилодез із бікортикальною установкою гвинтів у тіла хребців Th10, Th11, L2 і L3. Систему зміцнено за допомогою двох поперечних конекторів. Установлено епідуральні електроди і приймальну антену системи електро-нейростимуляції. Результати післяопераційної СКТ наведено на **Рис. 4**. На 5-й день післяопераційного



**Рис. 2.** Результати СКТ грудо-поперекового переходу пацієнтки Б. у доопераційний період: А – аксіальний зріз; Б – фронтальна реконструкція; В – сагітальна реконструкція; Г – 3D-реконструкція



**Рис. 4.** Результати післяопераційної КТ грудно-поперекового переходу пацієнтки Б: А – аксіальний зріз на рівні Th11; Б – фронтальна реконструкція; В – сагітальна реконструкція; Г – 3D-реконструкція

періоду спостерігали появу елементів суглобово-м'язового відчуття.

Спондилоптоз як найтяжчу форму травматичного ушкодження хребта вперше описав у 1882 р. Franz Neugebauer як спондилолітез V ступеня при зміщенні хребця L5 щодо крижів [9]. Нині цей термін використовують для характеристики ушкоджень, котрі супроводжуються більш ніж 100% вивихом хребця в сагітальній або коронарній площині.

За даними літератури, СП більш ніж у 80% випадків супроводжується клінікою неврологічних розладів ASIA A [8,10,11]. Значне поліпшення неврологічних функцій у післяопераційний період трапляється досить рідко, тому вихідний рівень у більшості випадків є предиктором довічної дисфункції [12]. Закономірно, що з огляду на переважно несприятливий функціональний прогноз протягом тривалого періоду часу зберігалася тенденція до обмеженого обсягу хірургічної корекції зазначеної патології. Як свідчить практика, ця тенденція спостерігається в деяких клініках і нині.

Удосконалення методів хірургічних втручань та накопичення клінічного матеріалу сприяли тому, що нині єдиним прийнятним результатом хірургічного втручання є відновлення осі хребта і декомпресія структур хребтового каналу незалежно від ступеня вихідної деформації, рівня неврологічних розладів та давності травми [13]. М.Р. Bellew і співавт. спостерігали регрес неврологічного дефіциту від ASIA A до ASIA D у пацієнтки, яка перенесла операцію з приводу травматичного СП хребця L2 через 3 тиж після травми [14]. Описано клінічні випадки позитивної неврологічної динаміки і при пізній декомпресії. Так, В. Landau і J. Ransohoff навели результати декомпресійної ламінектомії 7 пацієнтів у терміні від 1 міс до 17 років після травми. Зареєстровано деяке поліпшення неврологічних функцій у постраждалих [15].

Відомо, що сучасною тенденцією є максимально рання декомпресія структур хребтового каналу і стабілізація ушкодженого ХРС, що сприяє найбільшому відновленню неврологічних функцій [16]. Однак аналіз літератури свідчить про те, що при СП у більшості випадків застосовують відстрочену або пізню хірургію. М. Garg і співавт., які проаналізували

серію 5 пацієнтів з латеральним СП грудного відділу і грудно-поперекового переходу та виявили, що середня тривалість періоду між травмою і хірургічним втручанням становила 13,2 днів (від 4 до 30 днів) [11]. Ще більший інтервал зареєстрували А. Mishra і співавт. Так, із 20 пацієнтів у 13 хірургічну корекцію виконано через 2-3 тиж після травми, а в 1 – через 4 тиж [17]. Ф. Wang і співавт. за результатами лікування 11 пацієнтів з травматичним СП грудно-поперекового переходу виявили, що тривалість інтервалу не має перевищувати 3 тиж [18]. Однак така тактика спрямована переважно на збереження можливості управління СП і зменшення ймовірності розвитку ускладнень, супутніх травм, а не на збереження неврологічних функцій постраждалих.

Формування СП як одного з найтяжчих ушкоджень хребтового стовпа пов'язане з впливом високоінтенсивного травмувального чинника. Тому у більшості пацієнтів реєструють політравму. Загальна послідовність лікувальних заходів у таких постраждалих передбачає проведення реанімаційних заходів згідно з протоколом ATLS, хірургію небезпечних для життя ушкоджень внутрішніх органів, реконструктивно-стабілізувальну хірургію хребта і реабілітацію. Тривалість перших двох пунктів алгоритму визначає доопераційний термін. Крім того, специфіка ушкодження виключає застосування «spine damage-control» протоколу, який передбачає поділ хірургічного втручання на два етапи: декомпресію і стабілізацію первинно як менш травматичну хірургію та реконструкцію і додаткову стабілізацію вторинно, при нормалізації вітальних функцій, оскільки адекватна декомпресія при СП неможлива без відновлення осі хребта, тобто без реконструктивного етапу [19].

Деякі автори рекомендують використання краніо-тазового (halo-pelvic traction) або краніо-біфеморального витягування (halo-bifemoral traction) у доопераційний період для полегшення інтраопераційного управління СП [18,20,21]. Ми не використовуємо ці методи і вважаємо їх недоцільними через низку причин.

По-перше, накладення апаратів для виконання зазначених методів витягування є досить травматичною і болючою для пацієнта процедурою, а

наявність трофічних порушень у постраждалих із неврологічними розладами значно підвищує ризик гнійно-інфекційних ускладнень.

По-друге, як зазначено вище, абсолютна більшість пацієнтів з СП мають політравму. Сучасні підходи до терапії з торакальної, так і абдомінальної травми передбачають обов'язкове виконання елементів реабілітаційних заходів відразу після відновлення вітальних функцій. Повна іммобілізація пацієнта значно обмежує можливості відновної терапії та ускладнює догляд, підвищуючи ризик розвитку нейротрофічних виявів.

По-третє, скелетне витягування СП не дає змогу повною мірою прогнозувати характер зміщення всіх кісткових уламків і, відповідно, запобігти додатковій травматизації невральних структур. Відомо, що спочатку методи зовнішньої тракції були розроблені для корекції вивихів та перелоמו-вивихів шийного відділу хребта. Були чітко регламентовані типи ушкодження і ангуляція прикладання зусилля. Для грудо-поперекового відділу через значну ригідність лігаментозного апарату та вираженіший м'язовий корсет фактична вісь витягування завжди відповідає осі хребта, що виключає адаптацію методу до типу зміщення.

Аналіз даних літератури свідчить про обмежене використання зазначених методів витягування переважно – при лікуванні сколіозу. Крім того, обов'язковою умовою вибору інтенсивності тракції є електронейромоніторинг, а в подальшому – постійна клінічна оцінка неврологічного статусу [22,23]. У пацієнтів з ASIA A, що спостерігається в більшості випадків, зазначені методи неінформативні, тому виявити негативний вплив скелетного витягування на структури хребтового каналу при травматичному СП здебільшого неможливо. Зрозуміло, що ASIA A жодною мірою не свідчить про повне анатомічне ушкодження структур хребтового каналу і неможливість позитивної динаміки. На нашу думку, будь-який ятрогенно зумовлений додатковий механічний вплив на структури хребтового каналу незалежно від рівня неврологічних розладів є неприпустимим. Відповідно ортопедична доцільність вправлення СП без резекції тіла завжди менше важлива порівняно навіть з мінімальним підвищенням імовірності регресу неврологічних порушень.

Досі не визначено оптимальний хірургічний доступ для найефективнішої корекції СП. Дані літератури свідчать про успішне застосування передніх, задніх і комбінованих підходів [8,14,24,25,17]. При цьому зазначено, що для СП класичні п'ять AOSpine методів вправлення ушкоджень типу C за TLSICS практично не застосовують [13]. Щодо СП без можливості вправлення, то в більшості випадків використовують ізольований задній або задньо-передньо-задній доступ. У конкретній клінічній ситуації вибір визначається сукупністю чинників (специфіка ушкодження, кваліфікація хірурга, матеріально-технічна база тощо). Однак за інших однакових умов можна виділити переваги і недоліки зазначених варіантів хірургічних втручань.

На думку більшості дослідників, переваги переднього етапу при комбінованій хірургії полягають у більш зручній та контрольованій вертебректомії з видаленням усіх уламків і можливості використання ширшого спектра тілозамінних пристроїв із додатковою фіксацією пластиною, якщо конструкція

імплантату не передбачає самостійну його фіксацію до тіл хребців, суміжних з резектованим. До недоліків комбінованого підходу можна віднести те, що наявність додаткового хірургічного доступу збільшує ризик розвитку післяопераційних інфекційних ускладнень [26]. Метааналіз, проведений En-Hui Ren і співавт. виявив, що передня декомпресія порівняно із задньою супроводжується більшою тривалістю хірургічного втручання, більшим об'ємом крововтрати і, відповідно, більшою тривалістю перебування пацієнтів у стаціонарі без будь-яких переваг щодо регресу неврологічних розладів [27]. Yong-Ming Jin і співавт. відзначають, що порівняно з ізольованим заднім доступом комбінований супроводжується вираженішим больовим синдромом у ранній післяопераційний період [28].

При плануванні 360°-стабілізації слід урахувати, що установка вентральної або вентролатеральної пластини з фіксацією гвинтами до тіл хребців, суміжних із видаленим, ускладнює або унеможливає введення транспедикулярних гвинтів задньої стабілізувальної системи в тіла цих хребців [29]. Це призводить до застосування більш довгої фіксації, що біомеханічно недоцільно, значно збільшує навантаження на стабілізувальну конструкцію і в деяких випадках призводить до її неспроможності [30].

На нашу думку, основним недоліком використання комбінованого доступу є необхідність двічі обертати пацієнта під час виконання хірургічного втручання. На відміну від більшості інших травматичних ушкоджень грудо-поперекового відділу, при яких успішно використовують передньо-задній підхід, СП потребує задньо-передньо-заднього підходу. Це зумовлено тим, що для ефективної установки міжтілової опори потрібна відновлена вісь хребта, сформувати яку без видалення ушкодженого заднього опорного комплексу неможливо. Після задньої ламінектомії необхідної довжини формується абсолютна нестабільність оперованого ХРС, оскільки видалені залишки дуг і суглобових відростків перестають виконувати навіть мінімальну стабілізувальну функцію. Спроба ротації пацієнта в такому стані завжди пов'язана з дуже високим ризиком посилення змішання та ятрогенної травми невральних структур. Хоча запропоновано декілька варіантів інтраопераційної фіксації для безпечної ротації пацієнтів, усі вони мають обмежене застосування, а їх клінічна ефективність не доведена [29].

Одним з найсуперечливіших і найменш висвітлених у літературі аспектів хірургії тяжких травматичних ушкоджень грудо-поперекового відділу хребта є тактика обробки дурального мішка при візуально верифікованому повному анатомічному ушкодженні спинного мозку. Відомо, що на відміну від переломів Чанса СП навіть при розриві спинного мозку рідко характеризується повним горизонтальним перетином дурального мішка, що створює більше можливостей для його пластики, герметизації та відновлення ліквородинаміки. Однак нечисленні публікації свідчать про те, що в більшості випадків виконують лігування проксимального або проксимального і дистального відрізків [11]. Така тактика має переваги щодо профілактики ліквореї та зменшення тривалості операції. Деякі автори рекомендують зберігати ліквороток незалежно від ступеня ушкодження спинного мозку для профілактики розвитку гідромієлії [7]. Ми керуємося принципом максимально можливого відновлення анатомічної цілісності ушкоджених структур. Як

виявив аналіз перебігу післяопераційного періоду, застосування сучасних герметизувальних засобів інтраопераційно дає змогу повністю запобігти розвитку ліквореї.

Загальною тенденцією в хірургії хребця в останні десятиліття є використання «короткої фіксації» (short segment fixation), яка в найпростішому варіанті передбачає фіксацію по одному хребцю, краніально і каудально розташованому щодо ушкодженого. За літературними даними, основними показаннями до застосування короткої фіксації є уламкові переломи грудо-поперекового відділу (TLSICS тип A3, A4) та флексійно-дистракційні ушкодження (TLSICS тип B) [31, 32]. Перевагами короткої фіксації є збереження рухливості більшої кількості ХРС, зменшення навантаження на балки транспедикулярної системи стабілізації, зниження ризику розвитку грубих дегенеративних змін у сегментах, суміжних зі стабілізованими, зменшення тривалості хірургічного втручання і розмірів хірургічного доступу, економічна доцільність [33]. До недоліків належать менші реконструктивні можливості та значне підвищення навантажень на гвинти системи. R.F. McLain і співавт., які одними з перших описали поломку системи стабілізації при використанні методу короткої фіксації, зареєстрували частоту фрагментації гвинтів у 45% випадків протягом перших 6 міс після операції [34]. У наступних публікаціях автори зазначили, що довгу фіксацію доцільно використовувати для грудного відділу і грудо-поперекового переходу, тоді як коротку – для поперекового відділу. Відзначено, що ризик неспроможності фіксації значною мірою визначається характером ушкодження переднього опорного комплексу [35]. Алгоритм прогнозування спроможності короткої фіксації запропонований Т. McCormack і співавт. [36]. Автори розробили класифікацію розподілу навантаження (load sharing classification), згідно з якою враховують три основних параметри: ступінь компресії тіла хребця за даними сагітальної СКТ-реконструкції, розбіжність уламків за аксіальними зрізами СКТ, ступінь необхідної корекції кіфотичної деформації. Кожен із параметрів має 3 ступеня тяжкості та оцінюється балами від 1 до 3. Про високий ризик ушкодження системи стабілізації свідчить сума балів  $\geq 7$ . J.J. Chokshi та співавт. наводять дані щодо успішного застосування короткої фіксації у пацієнтів із перелоמו-вивихами навіть на рівні грудо-поперекового переходу [37]. Щодо СП як ушкодження, котре супроводжується ураженням усіх опорних колон і заднього лігаментозного комплексу, більшість дослідників рекомендують застосування довгої фіксації (по 2 або 3 хребця краніально та каудально щодо рівня ушкодження). У більшості випадків ми обмежуємося фіксацією двох розташованих вище і нижче хребців, використовуючи техніку установки системи, яка забезпечує найжорсткішу фіксацію. Зазначено, що, крім кількості точок фіксації, при використанні задньої транспедикулярної стабілізації важливе значення має техніка установки гвинтів, котра визначається як глибиною, так і проекцією введення.

Нині виділяють три основних методи установки транспедикулярного гвинта залежно від глибини його занурення в тіло хребця: центральний (mid-body), перикортикальний (pericortical) і бікорткальний (bicortical) [38]. На початкових етапах клінічного застосування транспедикулярної фіксації вважали, що оптимальною глибиною введення гвинта в тіло

хребця є 50–70% від його передньо-заднього розміру, оскільки спонгіоза не має принципового значення у визначенні жорсткості фіксації [39]. Накопичений клінічний досвід і аналіз ускладнень дав змогу виявити кореляцію між довжиною гвинта та механічною надійністю. Так, К.Ж. Karami та співавт., які на підставі моделей *ex vivo* поперекового відділу продемонстрували, що циклічне навантаження зменшує куту жорсткість фіксації на (25,6 $\pm$ 17,9)% (центральний метод), (20,8 $\pm$ 14,4)% (перикортикальний) і (14,0 $\pm$ 13,0)% (бікорткальний), при цьому екстракційне зусилля становить відповідно (583 $\pm$ 306), (713 $\pm$ 321) та (797 $\pm$ 285) Н [40]. Наведені результати підтверджено в низці досліджень [41,42]. Незважаючи на біомеханічну доцільність, бікорткальна транспедикулярна фіксація має обмежене застосування через низку причин. По-перше, вихід гвинта за межі вентральної поверхні тіла хребця пов'язаний з ризиком ушкодження великих судин [43]. На думку деяких авторів, цей ризик дещо перебільшений. Так, К.С. Foxh і співавт. за результатами аналізу 115 операцій виявили, що із 680 установлених гвинтів 33 мали безпосередній контакт з магістральними судинами, але в жодному випадку це не призвело до ускладнень. Термін спостереження становив 44 міс [44]. Другою причиною є підвищені вимоги до техніки установки і необхідність наявності всієї розмірної сітки гвинтів. Однак з огляду на необхідність досягнення максимально жорсткості стабілізації при СП у всіх аналізованих клінічних випадках нами використана бікорткальна методика.

Другим критерієм, який визначає жорсткість транспедикулярної фіксації, є кут введення гвинта в сагітальній площині. Щодо грудного відділу хребця використовують два варіанти проектування: анатомічний (anatomic) і прямолінійний (straight-forward). При анатомічній траєкторії гвинт вводять паралельно анатомічній осі ніжки дуги хребця, тобто в краніо-каудальному напрямку. Методика потребує використання лише поліаксіальних гвинтів, що ускладнює пряму деротацію у разі її проведення. Точка введення гвинта при анатомічній траєкторії фактично незмінна для всього грудного відділу, це значно полегшує установку, але призводить до травми верхнього суглобового відростка [45]. При прямолінійній траєкторії гвинт проходить паралельно верхній замикальній пластині, що дає змогу застосовувати моноаксіальні гвинти, але їх установка технічно складніша, оскільки точку введення обирають залежно від рівня. Методика потребує частішого використання інтраопераційного рентгенологічного контролю, але забезпечує збільшення екстракційного зусилля на 27% порівняно з анатомічною траєкторією [46].

На відміну від грудного відділу в поперековому кут нахилу ніжки дуги практично паралельний замикальній пластині, тому прямолінійна проекція є анатомічною. Однак за результатами низки досліджень, у поперековому відділі для бікорткальної стабілізації максимальну жорсткість фіксації забезпечує краніо-каудальний нахил гвинта [47]. Відзначено, що і в грудному, і в поперековому відділі можливість досягнення оптимальної щодо надійності проекції значною мірою визначається індивідуальними анатомічними особливостями, переважно – діаметром ніжки дуги. В аналізованій клінічній групі нам вдалося використати оптимальну ангуляцію в 55% випадків (22 із 40 установлених гвинтів).

Установка поперечних конекторів на балки транспедикулярної системи є додатковим методом стабілізації конструкції. Так, дослідження механічної стабільності грудо-поперекової транспедикулярної фіксації, проведені G. Lynn і співавт., продемонстрували, що ротаційна стабільність та жорсткість при бічних нахилах у конструкції з двома поперечними стяжками значно більші, ніж у системи без конекторів [48].

Таким чином, використання описаних методів посилення жорсткості транспедикулярної стабілізації дає змогу обмежитися використанням 4 пар транспедикулярних гвинтів і забезпечує стабільність міжтілової опори, яка при установці із заднього доступу не може бути безпосередньо зафіксована до тіл хребців.

### Висновки

Наведені дані свідчать про високу ефективність ізольованого заднього доступу при хірургічному лікуванні травматичного незвідного спондилоптозу грудо-поперекового переходу, як щодо відновлення осі хребта, так і щодо забезпечення стабільності спондилодезу. Показано, що телескопічний тілозамінний імплантат має переваги. Обов'язковою умовою є резекція всіх ушкоджених тіл і кісткових уламків для забезпечення як відновлення осі хребта, так і максимальної надійності міжтілової опори. Використані нами методи підвищення стабільності транспедикулярної фіксації мають важливе значення для забезпечення загальної спроможності спондилодезу.

### Розкриття інформації

#### Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

#### Етичні норми

Усі процедури, виконані пацієнтам під час дослідження, відповідають етичним стандартам інституційного та національного комітетів з етики і Гельсінкської декларації 1964 р. та її пізнішим поправкам або аналогічним етичним стандартам.

#### Інформована згода

Від кожного пацієнта отримано інформовану згоду.

#### Фінансування

Дослідження не мало спонсорської підтримки.

### Список літератури

- Rajasekaran S, Kanna RM, Shetty AP. Management of thoracolumbar spine trauma: An overview. *Indian J Orthop.* 2015 Jan-Feb;49(1):72-82. doi: 10.4103/0019-5413.143914
- Wood KB, Li W, Lebl DR, Ploumis A. Management of thoracolumbar spine fractures. *Spine J.* 2014 Jan;14(1):145-64. doi: 10.1016/j.spinee.2012.10.041
- Gertzbein SD. Scoliosis Research Society. Multicenter spine fracture study. *Spine (Phila Pa 1976).* 1992 May;17(5):528-40. doi: 10.1097/00007632-199205000-00010
- Knop C, Blauth M, Bühren V, Hax PM, Kinzl L, Mutschler W, Pommer A, Ulrich C, Wagner S, Weckbach A, Wentzensen A, Wörsdörfer O. Operative Behandlung von Verletzungen des thorakolumbalen Übergangs. Teil 1: Epidemiologie [Surgical treatment of injuries of the thoracolumbar transition. 1: Epidemiology]. *Unfallchirurg.* 1999 Dec;102(12):924-35. German. doi: 10.1007/s001130050507
- Gitelman A, Most MJ, Stephen M. Traumatic thoracic spondyloptosis without neurologic deficit, and treatment with in situ fusion. *Am J Orthop (Belle Mead NJ).* 2009 Oct;38(10):E162-5
- Maynard FM Jr, Bracken MB, Creasey G, Ditunno JF Jr, Donovan WH, Ducker TB, Garber SL, Marino RJ, Stover SL, Tator CH, Waters RL, Wilberger JE, Young W. International Standards for Neurological and Functional Classification of Spinal Cord Injury. *American Spinal Injury Association. Spinal Cord.* 1997 May;35(5):266-74. doi: 10.1038/sj.sc.3100432
- Vaccaro AR, Lehman RA Jr, Hurlbert RJ, Anderson PA, Harris M, Hedlund R, Harrop J, Dvorak M, Wood K, Fehlings MG, Fisher C, Zeiller SC, Anderson DG, Bono CM, Stock GH, Brown AK, Kuklo T, Oner FC. A new classification of thoracolumbar injuries: the importance of injury morphology, the integrity of the posterior ligamentous complex, and neurologic status. *Spine (Phila Pa 1976).* 2005 Oct 15;30(20):2325-33. doi: 10.1097/01.brs.0000182986.43345.cb
- Vaccaro AR, Oner C, Kepler CK, Dvorak M, Schnake K, Bellabarba C, Reinhold M, Aarabi B, Kandziora F, Chapman J, Shanmuganathan R, Fehlings M, Vialle L; AOSpine Spinal Cord Injury & Trauma Knowledge Forum. AOSpine thoracolumbar spine injury classification system: fracture description, neurological status, and key modifiers. *Spine (Phila Pa 1976).* 2013 Nov 1;38(23):2028-37. doi: 10.1097/BRS.0b013e3182a8a381
- Neugebauer F. Aetiologie der sogenannten Spondylolisthesis. *Archiv für Gynaekologie.* 1882;20(1):133-184. doi: 10.1007/bf01686736
- Denis F. The three column spine and its significance in the classification of acute thoracolumbar spinal injuries. *Spine (Phila Pa 1976).* 1983 Nov-Dec;8(8):817-31. doi: 10.1097/00007632-198311000-00003
- Garg M, Kumar A, Sawarkar DP, Singh PK, Agarwal D, Kale SS, Mahapatra AK. Traumatic Lateral Spondyloptosis: Case Series. *World Neurosurg.* 2018 May;113:e166-e171. doi: 10.1016/j.wneu.2018.01.206
- Meneghini RM, DeWald CJ. Traumatic posterior spondyloptosis at the lumbosacral junction. A case report. *J Bone Joint Surg Am.* 2003 Feb;85(2):346-50. doi: 10.2106/00004623-200302000-00026
- Kumar S, Patralekh MK, Boruah T, Kareem SA, Kumar A, Kumar R. Thoracolumbar fracture dislocation (AO type C injury): A systematic review of surgical reduction techniques. *J Clin Orthop Trauma.* 2020 Sep-Oct;11(5):730-741. doi: 10.1016/j.jcot.2019.09.016
- Bellew MP, Bartholomew BJ. Dramatic neurological recovery with delayed correction of traumatic lumbar spondyloptosis. Case report and review of the literature. *J Neurosurg Spine.* 2007 Jun;6(6):606-10. doi: 10.3171/spi.2007.6.6.16
- Landau B, Ransohoff J. Late surgery for incomplete traumatic lesions of the conus medullaris and cauda equina. *J Neurosurg.* 1968 Mar;28(3):257-61. doi: 10.3171/jns.1968.28.3.0257
- Wilson JR, Singh A, Craven C, Verrier MC, Drew B, Ahn H, Ford M, Fehlings MG. Early versus late surgery for traumatic spinal cord injury: the results of a prospective Canadian cohort study. *Spinal Cord.* 2012 Nov;50(11):840-3. doi: 10.1038/sc.2012.59
- Mishra A, Agrawal D, Gupta D, Sinha S, Satyarthee GD, Singh PK. Traumatic spondyloptosis: a series of 20 patients. *J Neurosurg Spine.* 2015;22(6):647-652. doi: 10.3171/2014.10.SPINE1440
- Wang F, Zhu Y. Treatment of complete fracture-dislocation of thoracolumbar spine. *J Spinal Disord Tech.* 2013;26(8):421-426. doi: 10.1097/BSD.0b013e31824e1223
- Stahel PF, VanderHeiden T, Flierl MA, Matava B, Gerhardt D, Bolles G, Beauchamp K, Burlew CC, Johnson JL, Moore EE. The impact of a standardized "spine damage-control" protocol for unstable thoracic and lumbar spine fractures in severely injured patients: a prospective cohort study. *J Trauma Acute Care Surg.* 2013 Feb;74(2):590-6. doi: 10.1097/TA.0b013e31827d6054
- Sunami Y, Imai T. Use of the halo-pelvic apparatus for treatment of fracture-dislocations of the thoracic and lumbar spines accompanied by paraplegia. *Acta medica Okayama.* 1977;31(6):361-368
- Hutchinson MR, Dall BE. Fracture-dislocation of the thoracic and lumbar spine: advantages of halo-bifemoral traction. *J Spinal Disord.* 1993;6(6):482-488. doi: 10.1097/00002517-199306060-00003
- Erdem MN, Oltulu I, Karaca S, Sari S, Aydoğan M. Intraoperative Halo-Femoral Traction in Surgical Treatment



- of Adolescent Idiopathic Scoliosis Curves between 70 degrees and 90 degrees : Is It Effective? *Asian Spine J.* 2018;12(4):678-685. doi: 10.31616/asj.2018.12.4.678
23. Zhang HQ, Gao QL, Ge L, Wu JH, Liu JY, Guo CF, Liu SH, Lu SJ, Li JS, Yin XH, Li F. Strong halo-femoral traction with wide posterior spinal release and three dimensional spinal correction for the treatment of severe adolescent idiopathic scoliosis. *Chin Med J (Engl).* 2012 Apr;125(7):1297-302
  24. Rahimizadeh A, Rahimizadeh A. Management of traumatic double-level spondyloptosis of the thoracic spine with posterior spondylectomy: case report. *J Neurosurg Spine.* 2015;23(6):715-720. doi: 10.3171/2015.3.SPINE14183
  25. Sekhon LH, Sears W, Lynch JJ. Surgical management of traumatic thoracic spondyloptosis: review of 2 cases. *J Clin Neurosci.* 2007;14(8):770-775. doi: 10.1016/j.jocn.2006.03.003
  26. Zhu Q, Shi F, Cai W, Bai J, Fan J, Yang H. Comparison of Anterior Versus Posterior Approach in the Treatment of Thoracolumbar Fractures: A Systematic Review. *International surgery.* 2015;100(6):1124-1133. doi: 10.9738/INTSURG-D-14-00135.1
  27. Ren EH, Deng YJ, Xie QQ, Li WZ, Shi WD, Ma JL, Wang J, Kang XW. [Anterior versus posterior decompression for the treatment of thoracolumbar fractures with spinal cord injury:a Meta-analysis]. *China Journal of Orthopaedics and Traumatology.* 2019 Mar 25;32(3):269-277. Chinese. doi: 10.3969/j.issn.1003-0034.2019.03.015
  28. Jin YM, Yang D, Shao HY, Zhang J, Huang YZ, Chen JP, Li XL. [Single midline posterior approach for 360 degree decompression and internal fixation with interbody bone graft fusion for severe thoracolumbar spinal fractures]. *China Journal of Orthopaedics and Traumatology.* 2013 Nov;26(11):901-6. Chinese.
  29. Paulo D, Semonche A, Tyagi R. Novel method for stepwise reduction of traumatic thoracic spondyloptosis. *Surg Neurol Int.* 2019;10:23. doi: 10.4103/sni.sni\_353\_17
  30. Mohi Eldin MM, Ali AM. Lumbar transpedicular implant failure: a clinical and surgical challenge and its radiological assessment. *Asian Spine J.* 2014;8(3):281-297. doi: 10.4184/asj.2014.8.3.281
  31. Liu YJ, Chang MC, Wang ST, Yu WK, Liu CL, Chen TH. Flexion-distraction injury of the thoracolumbar spine. *Injury.* 2003;34(12):920-923. doi: 10.1016/s0020-1383(02)00396-0
  32. Farrokhi MR, Razmkon A, Maghami Z, Nikoo Z. Inclusion of the fracture level in short segment fixation of thoracolumbar fractures. *Eur Spine J.* 2010;19(10):1651-1656. doi: 10.1007/s00586-010-1449-z
  33. Jindal R, Jasani V, Sandal D, Garg SK. Current status of short segment fixation in thoracolumbar spine injuries. *J Clin Orthop Trauma.* 2020;11(5):770-777. doi: 10.1016/j.jcot.2020.06.008
  34. McLain RF, Sparling E, Benson DR. Early failure of short-segment pedicle instrumentation for thoracolumbar fractures. A preliminary report. *J Bone Joint Surg Am.* 1993;75(2):162-167. doi: 10.2106/00004623-199302000-00002
  35. McLain RF. The biomechanics of long versus short fixation for thoracolumbar spine fractures. *Spine (Phila Pa 1976).* 2006;31(11 Suppl):S70-79; discussion S104. doi: 10.1097/01.brs.0000218221.47230.dd
  36. McCormack T, Karaikovic E, Gaines RW. The load sharing classification of spine fractures. *Spine (Phila Pa 1976).* 1994;19(15):1741-1744. doi: 10.1097/00007632-199408000-00014
  37. Chokshi JJ, Shah M. Outcomes of Including Fracture Level in Short- Segment Fixation for Thoracolumbar Fracture Dislocation. *Asian Spine J.* 2019;13(1):56-60. doi: 10.31616/asj.2018.0064
  38. Krag MH, Beynon BD, Pope MH, DeCoster TA. Depth of insertion of transpedicular vertebral screws into human vertebrae: effect upon screw-vertebra interface strength. *J Spinal Disord.* 1988;1(4):287-294. doi: 10.1097/00002517-198800140-00002
  39. Hirano T, Hasegawa K, Takahashi HE, Uchiyama S, Hara T, Washio T, Sugiyama T, Yokaichiya M, Ikeda M. Structural characteristics of the pedicle and its role in screw stability. *Spine (Phila Pa 1976).* 1997 Nov 1;22(21):2504-9; discussion 2510. doi: 10.1097/00007632-199711010-00007
  40. Karami KJ, Buckenmeyer LE, Kiapour AM, Kelkar PS, Goel VK, Demetropoulos CK, Soo TM. Biomechanical evaluation of the pedicle screw insertion depth effect on screw stability under cyclic loading and subsequent pullout. *J Spinal Disord Tech.* 2015 Apr;28(3):E133-9. doi: 10.1097/BSD.0000000000000178
  41. Abshire BB, McLain RF, Valdevit A, Kambic HE. Characteristics of pullout failure in conical and cylindrical pedicle screws after full insertion and back-out. *Spine J.* 2001;11(6):408-414. doi: 10.1016/s1529-9430(01)00119-x
  42. McKinley TO, McLain RF, Yerby SA, Sharkey NA, Sarigul-Klijn N, Smith TS. Characteristics of pedicle screw loading. Effect of surgical technique on intravertebral and intrapedicular bending moments. *Spine (Phila Pa 1976).* 1999;24(1):18-24, discussion 25. doi: 10.1097/00007632-199901010-00005
  43. Xu C, Hou Q, Chu Y, Huang X, Yang W, Ma J, Wang Z. How to improve the safety of bicortical pedicle screw insertion in the thoracolumbar vertebrae: analysis base on three-dimensional CT reconstruction of patients in the prone position. *BMC Musculoskelet Disord.* 2020 Jul 7;21(1):444. doi: 10.1186/s12891-020-03473-1
  44. Foxx KC, Kwak RC, Latzman JM, Samadani U. A retrospective analysis of pedicle screws in contact with the great vessels. *J Neurosurg Spine.* 2010;13(3):403-406. doi: 10.3171/2010.3.SPINE09657
  45. Kim TH, Lee SH, Yang JH, Hong JY, Suh SW. Clinical significance of superior articular process as a reference point for free-hand pedicle screw insertion in thoracic spine. *Medicine (Baltimore).* 2018;97(7):e9907. doi: 10.1097/MD.00000000000009907
  46. Lehman RA Jr, Polly DW Jr, Kuklo TR, Cunningham B, Kirk KL, Belmont PJ Jr. Straight-forward versus anatomic trajectory technique of thoracic pedicle screw fixation: a biomechanical analysis. *Spine (Phila Pa 1976).* 2003 Sep 15;28(18):2058-65. doi: 10.1097/01.BRS.0000087743.57439.4F
  47. Shibasaki Y, Tsutsui S, Yamamoto E, Murakami K, Yoshida M, Yamada H. A bicortical pedicle screw in the caudad trajectory is the best option for the fixation of an osteoporotic vertebra: An in-vitro experimental study using synthetic lumbar osteoporotic bone models. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2020;72:150-154. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2019.12.013
  48. Lynn G, Mukherjee DP, Kruse RN, Sadasivan KK, Albright JA. Mechanical stability of thoracolumbar pedicle screw fixation. The effect of crosslinks. *Spine (Phila Pa 1976).* 1997;22(14):1568-1572; discussion 1573. doi: 10.1097/00007632-199707150-00007