

КІЛЬКІСНЕ ВИЗНАЧЕННЯ СИЛИ ТРАВМУВАЛЬНОЇ ПОДІЇ ПРИ УШКОДЖЕННЯХ ХРЕБТА: РОЗРОБЛЕННЯ ТА ВАЛІДАЦІЯ ШКАЛИ

Нехлопочин О.С., Вербов В.В., Чешук Є.В., Вороді М.В.

ДУ «Інститут нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова НАМН України», Київ

Ключові слова: *травма хребта; механічна експозиція; еквівалентна висота падіння; енергетична метрика; інтенсивність механічного впливу; біомеханіка травмування*

Вступ. Травматичні ушкодження хребта формуються внаслідок широкого спектра механічних впливів – від низькоенергетичних побутових падінь до високоенергетичних навантажень. Застосовувані в клінічній практиці класифікації (AIS, AO Spine) детально описують анатоμο-морфологічні характеристики ушкодження, однак практично не відображають кількісних параметрів механічного впливу, що лежить в основі механізму травми. У результаті механізм події часто позначається спрощеними якісними маркерами на кшталт «низькоенергетична» або «високоенергетична» травма, що призводить до втрати суттєвої інформації. Континуальний характер механічної експозиції редукується до дискретних категорій, зазвичай не фіксується у медичній документації та наукових звітах, ускладнюючи порівнюваність когорт, коректну стратифікацію ризику та оптимізацію діагностичної тактики.

Запропоноване рішення полягає у введенні універсальної, фізично інтерпретованої міри зовнішнього впливу та побудові на її основі багаторівневої шкали, що доповнює морфологічні класифікації. Такою мірою обрано еквівалентну висоту падіння h_{eq} – умовну висоту вільного падіння, якій відповідає той самий рівень механічної енергії або зміни швидкості, що й у реальній події (падіння, ДТП тощо). Єдина шкала «метрів» дає змогу приводити різні механізми травми до спільного енергетичного масштабу – простого, наочного та зручного для клінічної комунікації.

Аналіз клінічної практики свідчить, що механічна енергія травматичного впливу фактично описується лише двома орієнтовними порогоми: падіння з висоти близько 1 м («низька енергія», з висоти власного зросту або нижче) та близько 6 м («висока енергія», орієнтовно 20 ft). Проміжок між цими значеннями залишається слабо формалізованим, хоча саме в цьому діапазоні локалізується більшість

клінічно значущих сценаріїв. Це зумовлює потребу у багаторівневій кількісній шкалі (0–10 балів), де рівні безпосередньо пов'язані з еквівалентною висотою падіння h_{eq} , а для спінально орієнтованої оцінки додатково враховуються два ключові модифікатори передачі навантаження на хребет: коефіцієнт передачі імпульсу T_{land} та ефективна дистанція уповільнення S_{land} . Ці параметри дають змогу відрізнити «жорсткий» та «м'який» контакт, наближаючи розраховане навантаження до реального впливу саме на хребетні структури.

Таким чином, концепція включає два взаємодоповнювальні рівні: базовий енергетичний рівень – масо-нейтральний показник h_{eq} , що характеризує величину механічного впливу як такого, незалежно від антропометричних особливостей пацієнта; та спінально орієнтований рівень – характеристики тієї самої енергії після «проходження» через біомеханіку контакту (позу, шлях уповільнення, демпфування імпульсу м'якими тканинами або системами безпеки), що дає змогу кількісно оцінити «жорсткість» впливу саме для хребта, а не лише загальну силу події. Сукупність цих параметрів формує кількісну шкалу з клінічно інтерпретованими рівнями, яка забезпечує більш точний, відтворюваний і стратифікований опис механічної експозиції в клінічних дослідженнях і практиці.

Мета. Розробити, теоретично обґрунтувати та провести первинну валідацію багаторівневої 0–10-бальної шкали кількісної оцінки інтенсивності зовнішнього механічного впливу при травмах хребта на основі еквівалентної висоти падіння h_{eq} як універсальної енергетичної метрики з урахуванням спінально орієнтованої похідної, яка інтегрує показники T_{land} та S_{land} для адекватного відображення навантаження саме на хребет.

Матеріали та методи. Розроблення та перевірка інструмента виконані відповідно до принципів COSMIN для вимірювальних шкал у медицині. Послідовно оцінювалися конструктивна та критеріальна валідність, міжекспертна та абсолютна надійність, діагностична цінність за показниками ROC/AUC, узгодженість за Bland–Altman і стабільність порогових значень, що забезпечує наукову обґрунтованість та відтворюваність отриманих результатів. Тематичний огляд літератури (PubMed, Scopus, Web of Science, 1990–2025) дав змогу визначити основні порогові орієнтири та модифікатори T_{land} і S_{land} . Для емпіричної валідації застосовано два незалежні масиви даних: 40 стандартизованих клінічних віньєток, які рівномірно охоплюють увесь діапазон механічних впливів, та 52 реальні випадки травм грудно-

поперекового переходу (Th11–L2) з обов'язковою КТ/МРТ-верифікацією морфологічних характеристик ушкодження. Це дає змогу зіставити кількісні параметри механічної експозиції з фактичними анатомічними змінами.

Базовою метрикою обрано h_{eq} – кількісний показник механічної експозиції, що відображає енергію або зміну швидкості та приводиться до універсальної шкали «метрів падіння». Показник є масо-нейтральним, легко відтворюється з анамнестичних даних і є інтуїтивно зрозумілим для клініцистів. Спінально орієнтована похідна (умовно «спінально-еквівалентна висота») уточнює h_{eq} з урахуванням того, яка частка імпульсу фактично передається на хребет і на якому шляху цей імпульс гаситься. Менший шлях уповільнення та більша передача імпульсу формують жорсткіший характер впливу за однакової вихідної енергії. Обидві метрики залишаються масо-нейтральними, що є принципово важливим для міжпопуляційних зіставлень.

Для кількісного ранжування побудовано шкалу 0–10, яка ґрунтується на енергетичних діапазонах h_{eq} , а для спінально орієнтованої оцінки – на тих самих рівнях із урахуванням T_{land} і S_{land} . У межах аналізу вивчалися міжекспертна узгодженість шляхом обчислення ICC(2,1) та ICC(2,k), а також зваженої κ ; абсолютна точність за SEM та MDC₉₅; асоціації отриманих метрик із морфологічними ознаками ушкодження, включно з клиновидною деформацією, компрометацією спінального каналу та порядковою тяжкістю за AO Spine; предиктивні властивості в логістичних моделях щодо порогу $\geq A3$; діагностична ефективність за ROC-кривими та AUC з визначенням оптимальних порогів; узгодженість із еталонними розрахунками за Bland–Altman, а також стабільність порогів у межах аналізу чутливості.

Результати. У концептуальному плані запропоновано та реалізовано дворівневий підхід до кількісної оцінки зовнішньої механічної експозиції: першим рівнем є енергетична, масо-нейтральна шкала h_{eq} , другим – спінально орієнтована похідна, що враховує передачу імпульсу та шлях гальмування. На основі цих метрик побудовано 11-рівневу шкалу 0–10 з клінічно інтерпретованими межами – від повної відсутності зовнішнього впливу (0) до катастрофічних подій, коли h_{eq} перевищує 15 м (10 балів). Для дорожньо-транспортних ситуацій реалізовано перерахунок через Δv .

Міжекспертна надійність виявилася високою: ICC(2,1)=0,84 для базової метрики та 0,79 для спінально орієнтованої; при усередненні оцінок експертів ICC(2,k)=0,95 і 0,92 відповідно. Абсолютна точність

становила SEM 0,80–0,95 бала, а мінімальна діагностично значуща зміна MDC_95 – приблизно 2,2–2,6 бала. Межі рівнів продемонстрували стійкість: відхилення більш ніж на ± 1 рівень траплялися менш ніж у 7% випадків. Сукупно це свідчить, що інструмент відтворюваний як між різними оцінювачами, так і при повторних вимірюваннях, а «кроковість» шкали зберігає стабільність за умов помірної варіабельності вихідних припущень.

Валідність, як змістова, так і критеріальна, підтвердилася статистичним узгодженням із морфологічними ознаками за даними КТ/МРТ. Кореляція з клиновидною деформацією тіл хребців становила $r=0,58$, із компрометацією спінального каналу – $r=0,49$, а з порядковою тяжкістю за АО Spine – $r=0,62$ ($p<0,001$). Чим вищою була механічна експозиція, тим виразнішими виявлялися структурні порушення та «старшим» був клас ушкодження. У логістичній моделі збільшення h_{eq} на 1 м майже вдвічі підвищувало шанси отримання ушкодження категорії $\geq A3$ (OR=1,85; 95% ДІ 1,45–2,38). Діагностична цінність спінально орієнтованої метрики для ідентифікації переломів становила AUC=0,82; оптимальним орієнтиром був приблизно 1,3 м (чутливість близько 0,76; специфічність близько 0,72). Отримані значення підтверджують практичну корисність шкали саме як інструмента стратифікації ризику.

Аналіз Bland–Altman продемонстрував мінімальне систематичне зміщення для h_{eq} і прийнятний діапазон узгодження для спінально орієнтованої метрики; ознак гетероскедастичності не виявлено, що свідчить про стабільну точність у всьому діапазоні значень. Чутливість класифікації до варіацій меж рівнів та до зміни параметрів T_{land} і S_{land} виявилася невисокою: навіть при варіаціях на рівні ± 10 –15% більшість випадків зберігала той самий рівень або зміщувалася лише на один, що у клінічній практиці розглядається як стійка поведінка шкали.

Практичне значення полягає в тому, що масо-нейтральні метрики, особливо спінально орієнтована похідна, забезпечують пряме фізичне тлумачення «жорсткості події», зберігаючи зрозумілість для клініцистів («еквівалент падіння з N метрів», «жорсткий або м'який контакт»). Вони не замінюють морфологічні класифікації (АО Spine, AIS), а доповнюють їх: морфологія пояснює, що саме ушкоджено, тоді як шкала кількісно відображає силу травмувального впливу. Така дворівнева система покращує комунікацію між бригадою догоспітального етапу, приймальним відділенням, радіологом та вертебрологом, а також підвищує обґрунтованість рішень щодо маршрутизації та обсягу візуалізації.

Для прискорення розрахунків та зменшення залежності від довідкових таблиць створено тестову веб-версію калькулятора, яка реалізує модульне введення типових сценаріїв (падіння, дорожньо-транспортна подія) та автоматично підбирає рекомендовані діапазони параметрів передачі імпульсу й шляху уповільнення залежно від пози, поверхні та умов зіткнення. Значення можна використовувати «за замовчуванням» або змінювати вручну, а результати оновлюються миттєво. Тестова версія доступна за адресою: www.spine.org.ua/scale.

Висновки. Представлено та первинно валідовано багаторівневу шкалу 0–10 для кількісної оцінки зовнішньої механічної експозиції при травмах хребта. Її основою є еквівалентна висота падіння h_{eq} , а спінально орієнтована похідна додатково враховує передачу імпульсу T_{land} та шлях гальмування S_{land} , що дає змогу адекватно оцінювати «жорсткість» впливу саме на хребет. Інструмент є фізично прозорим, клінічно інтерпретованим та масо-нейтральним. Надійність підтверджують висока міжекспертна узгодженість (ICC(2,1) на рівні приблизно 0,8–0,84; ICC(2,k) близько 0,92–0,95), SEM у межах 0,8–0,95 бала та MDC₉₅ приблизно 2,2–2,6 бала. Валідність продемонстровано зв'язками з морфологічними показниками (кореляції на рівні $r \approx 0,5–0,6$ для ключових ознак) та критеріальною діагностичною цінністю (AUC $\approx 0,82$; орієнтовна межа близько 1,3 м для виявлення переломів). Збільшення h_{eq} на 1 м статистично значимо підвищує шанси тяжких ушкоджень з OR близько 1,85.

Практична роль шкали полягає у доповненні наявних класифікацій, забезпеченні єдиного «мовного простору» для опису сили події замість нечітких позначень «низька» чи «висока» енергія, покращенні стратифікації ризику та підвищенні порівнюваності досліджень, а також у підтримці триажу та планування обсягу візуалізації. Інструмент особливо корисний там, де механізм події відомий краще, ніж морфологія, – на ранніх етапах маршрутизації та в багатоцентричних дослідженнях. Основними обмеженнями є первинний характер представленої валідації; у майбутньому необхідні зовнішні мультицентрові перевірки, уточнення калібрувань (T_{land} , S_{land} , меж рівнів, еталонних параметрів гальмування), розширення бібліотеки сценаріїв та регіонально специфічні адаптації для інших відділів хребта, зокрема шийного. Технологічно доцільним є інтегрування інструмента до систем EMR/EMS, використання телеметрії (EDR, носимі IMU-сенсори) та впровадження зручних калькуляторів для стандартизованого введення параметрів.