

## Моделювання роботи м'язів лопатки та ключиці при відведенні верхньої кінцівки

Долгополов О.В.<sup>1</sup>, Безрученко С.О.<sup>1</sup>✉, Салюк Р. В.<sup>1</sup>, Суворов В.Л.<sup>1</sup>, Карпінська О.Д.<sup>2</sup>, Карпінський М.Ю.<sup>2</sup>

**Реферат. Вступ.** Моделювання складного комбінованого руху, як відведення верхньої кінцівки, із залученням декількох суглобів та груп м'язів потребує складного математичного апарату. Саме тому його представляють, як послідовний рух в плечовому, грудинно-ключичному та надплечово-ключичному суглобах. Це не відповідає анатомічному руху, але дозволяє отримати уявлення про величини м'язових зусиль, які можуть виникати при відведенні кінцівки. **Мета.** Розглянути роботу м'язів, відповідальних за рух лопатки та ключиці при відведенні плеча. **Матеріали і методи.** Моделювання проводили в пакеті OpenSim. За основу взята модель DAS3. В структуру моделі входять 6 суглобових з'єднань: надплечово-ключичне, грудинно-ключичне, плечове, плечо-ліктьове, плечо-променево та променево-зап'ясткове. Модель містить 138 м'язів. Моделювали рухи у грудинно-ключичному суглобі та надплечово-ключичному. Відведення верхньої кінцівки вивчається в діапазоні від 0° до 90°. **Результати.** Грудинно-ключичний суглоб починає працювати при відведенні плеча біля 30°. Сила *m. rhomboid* зростає до 400 Н на куті підйому ключиці біля 20-25°. В подальшому на *m. rhomboid* впливає ротація лопатки і на максимумі відведення плеча сила м'яза становить 700 Н. Крутний момент зростає до 32 Нм. На початку руху лопатки вектор сили верхніх пучків *m. serratus anterior* направлений у бік ключиці, що обумовлює зниження сумарної сили до кута її підйому у 10°. При подальшому русі ключиці сила *m. serratus anterior* зростає до 370 Н до кута її підйому 20-25°. Крутний момент, який створює м'яз, має низхідний характер – від 30 Нм до 15 Нм. При підйомі ключиці нижня порція *m. serratus anterior* розвиває силу для утримання лопатки від 475 Н до 535 Н на максимумі від 20°. Крутний момент зростає після 10° підйому ключиці до 50 Нм. Початок руху ключиці супроводжується збільшенням сумарної сили *m. trapezius scapulae* до 1150 Н при куті ротації ключиці 10°. При подальшому її підйомі сила м'яза знижується до 970 Н. При ротації лопатки сила м'язу знову зростає до 1150 Н при куті абдукції плеча 90°. Збільшення сили *m. levator scapulae* до 200 Н спостерігаємо тільки на початку руху ключиці. Ротація лопатки потребує збільшення сили м'яза до 160 Н. **Висновок.** В результаті моделювання роботи м'язів, відповідальних за рух лопатки та ключиці було визначено порядок залучення суглобів і відповідних м'язів для забезпечення абдукції плеча до 90°. Отримані дані дозволяють визначити можливі порушення функціонування плечового поясу при ушкодженні ключиці чи лопатки, або при їх комбінованій травмі.

**Ключові слова:** моделювання, ключиця, лопатка, сила м'язів, відведення верхньої кінцівки.

### Вступ

Відведення плеча (абдукція) – це рух, при якому рука відводиться від тулуба в бічній площині. У

цьому процесі лопатка (*scapula*) та її суглоби відіграють ключову роль, забезпечуючи стабільність і координацію руху.

У процесі відведення плеча залучені плечовий, надплечово-ключичний та грудинно-ключичний суглоби. [1]

Лопатка забезпечує основу для рухів у плечовому суглобі та є базою для кріплення м'язів. Серед основних суглобів, пов'язаних з лопаткою є

✉ Безрученко С.О., [drbezruchenko@gmail.com](mailto:drbezruchenko@gmail.com)

<sup>1</sup>ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», Київ, Україна

<sup>2</sup>ДУ «Інститут патології хребта та суглобів ім. проф. М.І. Ситенка НАМН України», Харків, Україна

плечовий суглоб (glenohumeral joint), який відповідає за основний обсяг руху при відведенні. Надплечово-ключичний суглоб (acromioclavicular joint) – з'єднує акроміон лопатки з ключицею, забезпечуючи стабільність і дозволяючи незначні ковзаючі рухи. Грудинно-ключичний суглоб (sternoclavicular joint), що з'єднує ключицю з грудиною, дозволяє ключиці підніматися, опускатися та обертатися. Лопатково-грудний суглоб (scapulothoracic joint) – не справжній суглоб, а функціональне з'єднання між лопаткою та грудною кліткою. Лопатка ковзає по ребрах за допомогою м'язів.

Ключиця (clavicle) відіграє важливу роль у відведенні плеча (абдукції), забезпечуючи стабільність та підтримку рухів лопатки та плечового суглоба. Вона діє як анатомічна сполучна ланка між верхньою кінцівкою та тулубом, дозволяючи передавати рухи та сили через плечовий пояс. Ключиця виконує функції стабілізації плечового поясу – утримує лопатку на правильній відстані від тулуба, забезпечуючи стабільну основу для рухів руки; передачі рухів – координує рухи між тулубом, лопаткою та верхньою кінцівкою та захисту – захищає судинно-нервовий пучок і верхню частину легень, що лежать під нею.

При відведенні плеча виділяють декілька фаз руху суглобів [2]:

0–30° (початкова фаза). Основний рух відбувається в плечовому суглобі. Лопатка та ключиця залишаються відносно стабільними, але може початись легке зміщення вгору. Основні м'язи: надостъовий (supraspinatus) та дельтоподібний (deltoid).

30–90° (середня фаза). Лопатка починає активно рухатися, виконуючи зовнішнє обертання (upward rotation) і піднімання. Надплечово-ключичний суглоб дозволяє легке обертання ключиці, а у грудинно-ключичному суглобі рух ключиці забезпечує опору і рухомість лопатки. Піднімання ключиці (elevation) на 15–20° дозволяє лопатці обертатися вгору (upward rotation). М'язи, що відповідають за рух – верхня та нижня частини трапецієподібного м'яза (trapezius), передній зубчастий м'яз (serratus anterior).

90–180° (кінцева фаза). Лопатка продовжує обертатися вгору та назовні, щоб забезпечити повний діапазон руху. Лопатково-грудний суглоб дозволяє ковзання лопатки по грудній клітці. Для досягнення повної елевачії (180°) необхідне додаткове обертання хребта та нахил тулуба. М'язи, які забезпечують рух: трапецієподібний, передній зубчастий, ромбоподібні м'язи. Ключиця продовжує підніматися та обертатися назад (posterior rotation) у грудинно-ключичному суглобі, дозво-

ляючи лопатці завершити своє зовнішнє обертання. Максимальний кут піднімання ключиці може досягати 30–40°, що необхідно для повного відведення руки до 180°. Надплечово-ключичний суглоб забезпечує стабільність і дозволяє лопатці ковзати по грудній клітці через лопатково-грудний суглоб.

Відведення плеча – це складний рух, який включає скоординовану роботу всіх перелічених суглобів і м'язів. Воно поділяється на кілька фаз, де лопатка відіграє важливу роль у так званому лопатково-плечовому ритмі (scapulohumeral rhythm). Цей ритм полягає в тому, що на кожні 2° відведення в плечовому суглобі припадає приблизно 1° руху лопатки. Відведення плеча відбувається завдяки скоординованій роботі плечового пояса, де ключиця забезпечує зв'язок між лопаткою та тулубом. Її роль змінюється залежно від фази абдукції [3]

Моделювання такого складного комбінованого руху із залученням декількох суглобів та груп м'язів потребує дуже складного математичного апарату, тому при моделюванні виконують вимушене спрощення, і представляють відведення кінцівки, як послідовний рух в плечовому, грудинно-ключичному та надплечово-ключичному суглобах. Це припущення не відповідає анатомічному руху, але дозволяє отримати уявлення про величини м'язових зусиль, які можуть виникати при відведенні верхньої кінцівки. [4, 5, 6].

М'язи, що підтримують рух лопатки та ключиці при абдукції плеча:

**Передній зубчастий м'яз (serratus anterior)** – відповідає за зовнішнє обертання та протракцію (висування вперед) лопатки. Опосередковано впливає на ключицю через її дію на лопатку, сприяючи її протракції.

**Трапецієподібний м'яз (trapezius)** – верхня частина піднімає лопатку та ключицю, середня та нижня – обертають лопатку назовні та сприяють стабілізації та обертанню ключиці.

**Ромбоподібні м'язи (rhomboids)** – стабілізують лопатку, запобігаючи надмірному висуванню.

**М'яз-підіймач лопатки (levator scapulae)** – допомагає піднімати лопатку.

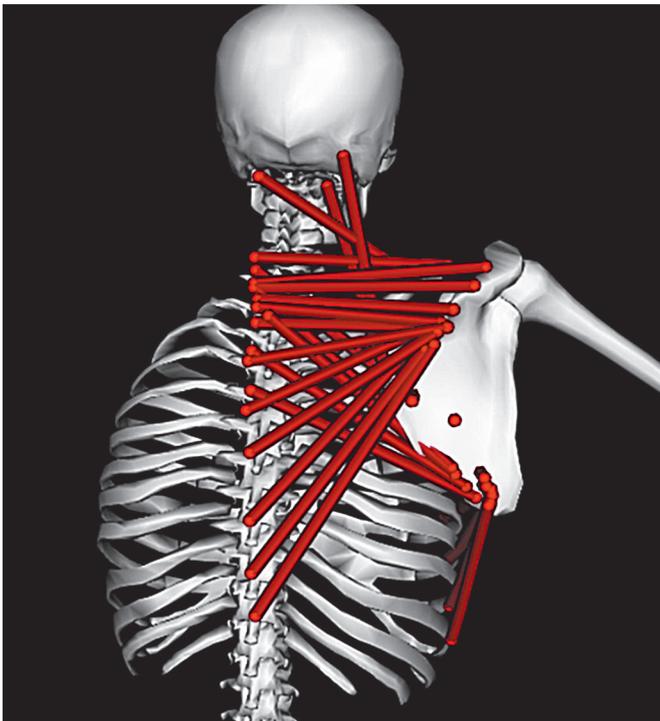
Лопатка виконує кілька ключових функцій під час відведення: стабілізації – вона є платформою для плечового суглоба, забезпечуючи стабільну основу для руху руки; обертання – зовнішнє обертання лопатки (upward rotation) дозволяє плечовій кістці рухатися вгору без обмежень; координації – лопатка забезпечує плавність і ефективність руху, розподіляючи навантаження між суглобами та м'язами. Ключиця забезпечує стабільність і координацію між лопаткою, плечовим суглобом і тулубом [7].

**Мета роботи.** Розглянути роботу м'язів, відповідальних за рух лопатки та ключиці при відведенні плеча.

## Матеріали і методи

Моделювання проводили в пакеті OpenSim [8]. OpenSim – відкрита платформа, розроблена в Центрі біомедичних обчислень НІН Стенфордського університету для м'язово-скелетного моделювання, яка дозволяє будувати цифрові моделі людського тіла, відтворювати рухи та оцінювати внутрішні біомеханічні параметри такі як м'язові сили, реактивні навантаження в суглобах та інше.

В основу взята модель DAS3 (рис. 1), яка є компонентом проекту Dynamic Arm Simulator, використовується для симуляції в реальному часі біомеханіки плечового поясу та верхньої кінцівки. Цей симулятор був створений в рамках проекту НІН «Контрольована мозком гібридна функціональна електрична стимуляція» під керівництвом доктора Роберта Ф. Кірша з Case Western Reserve University. Фундаментальні параметри та математичне підґрунтя моделі описані в публікації Chadwick E. та співавторів [5].



**Рис. 1.** Зовнішній вигляд моделі DAS3

В структуру вищезгаданої моделі входять 6 суглобових з'єднань: надплечово-ключичне (*articulatio acrimio-clavicularis – ac*), грудинно-ключичне (*articulatio sternoclavicularis – sc*), плечове (*articulatio glenohumeralis – gh*), плечо-ліктьове (*articulatio humeroulnaris – hu*), пле-

чо-променево (*articulatio humeroradialis – hr*) та променево-зап'ясткове (*articulatio radiocarpalis – rc*). Загалом модель містить 138 м'язів.

Для вивчення відведення плеча необхідно змодельовати рухи у грудинно-ключичному суглобі (SC) та надплечово-ключичному (AC). В моделі відведення здійснюється зміна кута в суглобах по осі Z. Виходячи з особливості моделі, відведення верхньої кінцівки вивчається від 0° до 90° [9].

Сила, яку розвивають м'язи верхньої кінцівки та плеча, є ключовим аспектом біомеханіки людського руху. Вона залежить від кількох факторів:

- Фізіологічний поперечний переріз м'яза (ФПП): Чим більший ФПП, тим більшу силу може генерувати м'яз. Наприклад, дельтоподібний м'яз завдяки своїй структурі здатен створювати значну силу для підняття руки.

- Довжина м'яза: Максимальна сила досягається при оптимальній довжині м'язових волокон, коли актин і міозин мають найбільшу зону перекриття (згідно з моделлю ковзних ниток).

- Кут прикладання сили: Ефективність м'яза залежить від кута, під яким він прикріплюється до кістки, що впливає на механічний момент.

Крутний момент (або момент сили) є фізичною величиною, яка характеризує обертальну дію сили відносно точки чи осі обертання. У контексті верхньої кінцівки крутний момент виникає, коли м'язи генерують силу, що передається через важелі (кістки) до суглобів. Формула крутного моменту виглядає так:

$$M = F \cdot d \cdot \sin\theta$$

де M – крутний момент (Н•м),

F – сила, прикладена м'язом (Н),

d – відстань від осі обертання до точки прикладання сили (довжина важеля),

$\theta$  – кут між вектором сили та важелем.

У плечовому суглобі крутний момент залежить від позиції руки. Наприклад, при відведенні руки в сторону дельтоподібний м'яз створює крутний момент. Максимальний крутний момент виникає, коли рука перебуває під кутом приблизно 90° до тулуба, оскільки довжина важеля та кут прикладання сили є оптимальними.

Крутний момент також залежить від зовнішніх навантажень (наприклад, ваги, яку тримає людина) та протидії сил тяжіння. У динамічних рухах сумарний крутний момент є результатом дії м'язових сил, інерційних сил і зовнішніх факторів.

## Результати

Абдукція плеча – доволі складний рух, до якого залучено майже всі суглоби плечового поясу: плечовий суглоб (*glenohumeral joint*),

грудинно-ключичний суглоб (sternoclavicular joint), (в укр. перекл.) акроміально-ключичний суглоб (acromioclavicular joint) і лопатково-грудний суглоб (scapulothoracic joint, хоча це не справжній суглоб, а функціональна взаємодія).

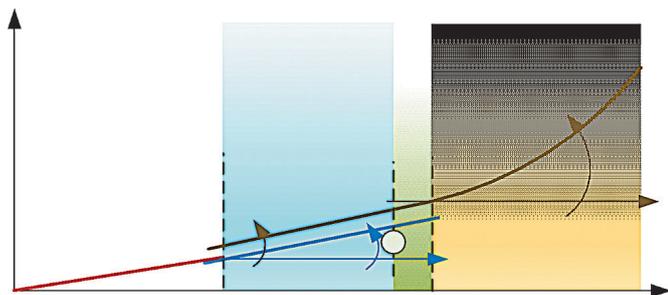
Відведення до  $30^\circ$  здійснюється переважно за рахунок плечового суглоба. Надостовий м'яз (supraspinatus), є основним рушієм абдукції в початковій фазі, він ініціює початок руху. В цій фазі також активні дельтоподібний м'яз (зокрема його середня частина), який забезпечує так звану депресію голівки плеча та інші м'язи ротаторної манжети для стабілізації плечового суглобу.

Для подальшого руху залучаються грудинно-ключичний суглоб, який піднімає ключицю та через надплечово-ключичний суглоб – лопатку. Кут підйому ключиці становить за анатомічними даними від  $5^\circ$  до  $30^\circ$ , що відповідає куту відведення плеча десь від  $30^\circ$  до  $60^\circ$ .

Для подальшої абдукції більше  $60^\circ$  залучається надплечово-ключичний суглоб.

Але основний внесок в абдукцію плеча (після  $30^\circ$ ) забезпечує ротація лопатки вгору (upward rotation) у лопатково-грудному суглобі, що здійснюється за участі м'язів, таких як трапецієподібний (trapezius) і передній зубчастий (serratus anterior). В моделі цей суглоб не розглядається, тому роботу м'язів будемо розглядати через рух надплечово-ключичного суглоба. В нашій моделі розглядається відведення плеча до  $90^\circ$ , що відповідає куту підйому лопатки  $20^\circ$ .

Схематично рух суглобів при абдукції плеча показано на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема роботи суглобів плечового поясу при абдукції плеча.

До кута абдукції плеча переважно працює плечовий суглоб. Починаючи з кута абдукції плеча близько  $30^\circ$  в рух залучається ключиця. Її обсяг руху в грудинно-ключичному суглобі становить від  $5^\circ$  до  $30^\circ$ . Підйом ключиці відбувається до кута абдукції плеча приблизно  $60^\circ$ . При підйомі ключиці на  $20\text{--}25^\circ$  починається рух лопатки у надплечово-ключичному суглобі. Обсяг руху становить від  $0^\circ$  до  $30^\circ$  при абдукції плеча до  $90^\circ$ .

В моделі, яку розглядаємо, відведення плеча

включає скоординовану роботу **плечового, грудинно-ключичного та надплечово-ключичного суглобів.**

Розглянемо роботу м'язів, відповідальних за рух ключиці і лопатки при абдукції плеча.

Ромбоподібні м'язи (mm.rhomboid) працюють у тісній взаємодії з грудинно-ключичним і надплечово-ключичним суглобами, забезпечуючи стабільність і баланс рухів лопатки. Вони відіграють допоміжну, але важливу роль у відведенні плеча (абдукції), забезпечуючи стабілізацію лопатки та підтримання її правильного положення під час руху. Ці м'язи розташовані у верхній частині спини між хребтом і медіальним краєм лопатки.

В початковій фазі ( $0\text{--}30^\circ$ ) переважно працюють м'язи, відповідальні за рух плечового суглоба. Грудинно-ключичний суглоб починає працювати при відведенні плеча біля  $30^\circ$  (рис. 2). Ключиця з цього моменту починає поступовий підйом до кута близько  $30^\circ$ , одночасно з нею відбувається ротація лопатки. Сила mm.rhomboid зростає до 400 Н на куті підйому ключиці біля  $20\text{--}25^\circ$  (рис. 3, а). В подальшому на mm.rhomboid впливає ротація лопатки (рис. 3, в) і на максимумі відведення плеча ( $90^\circ$ ) сила м'яза становить 700 Н.

Крутний момент грудинно-ключичного суглоба, який створюють ромбовидні м'язи зростає до 32 Нм при куті підйому  $20\text{--}25^\circ$  (рис. 3, б). Для надплечово-ключичного суглобу крутний момент направлений у бік дії вектора сили м'язів, максимум становить 72 Нм (рис. 3, г).

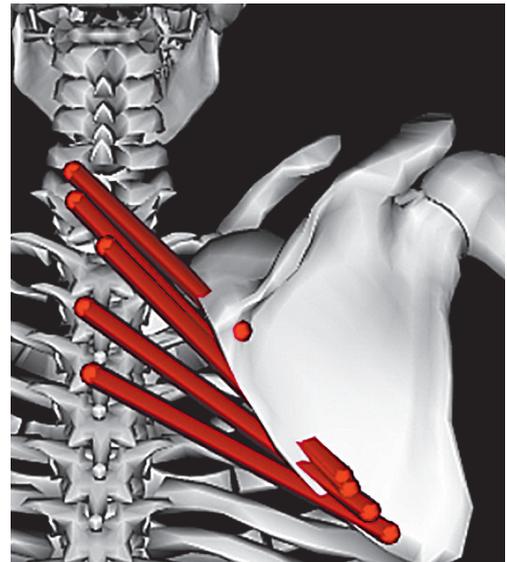
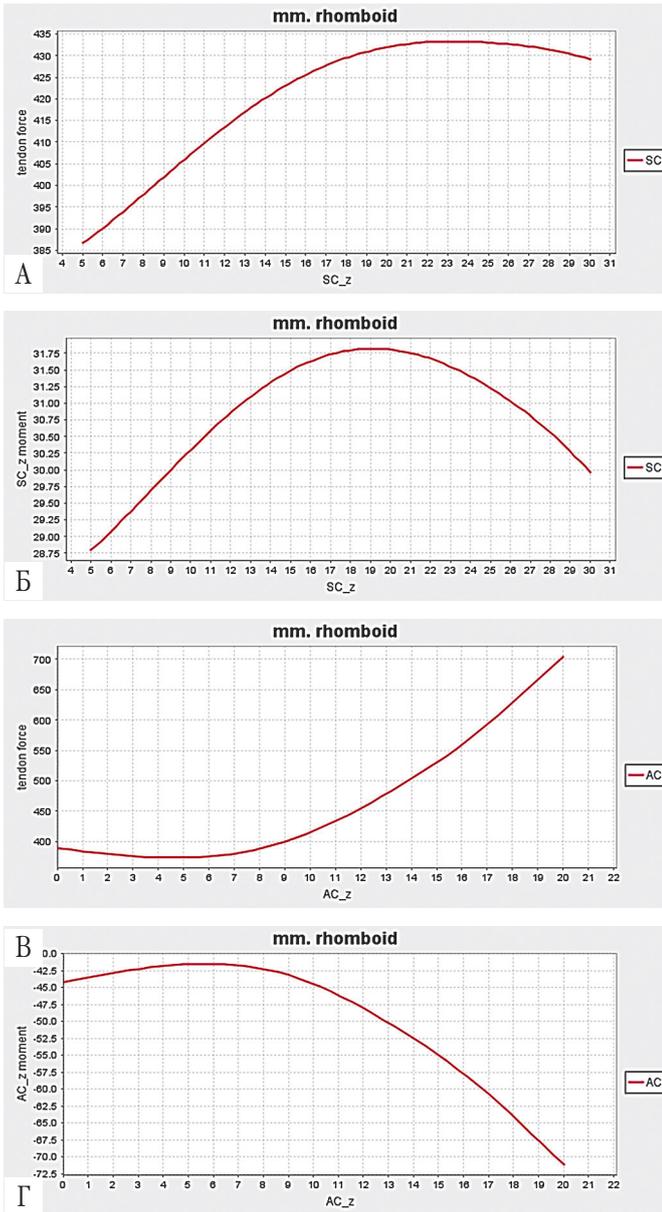
Таким чином, сила mm.rhomboid при відведенні плеча до  $90^\circ$  зростає від  $\sim 380$  Н до  $\sim 700$  Н.

**Передній зубчастий м'яз (serratus anterior)** відіграє ключову роль у відведенні плеча (абдукції), забезпечуючи рух і стабілізацію лопатки в рамках лопатково-плечового ритму. Він розташований на бічній поверхні грудної клітки, прикріплюючись до зовнішньої поверхні 1–8/9 ребер і до медіального краю лопатки.

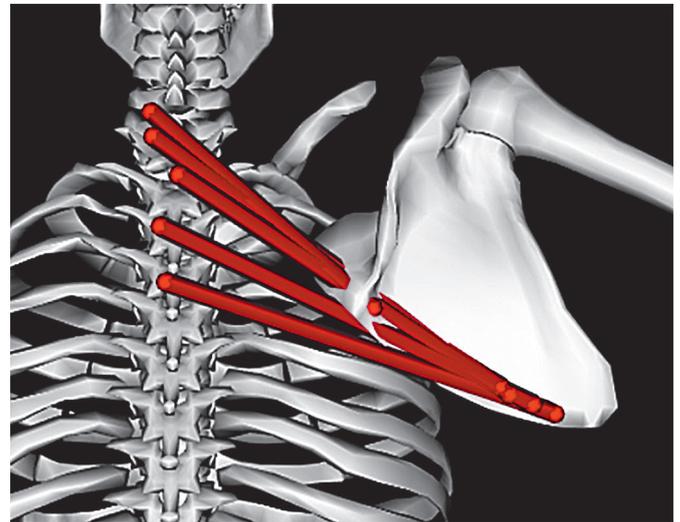
Верхня порція починається від 1–2 ребер і прикріплюється до верхнього кута лопатки. В моделі середня і нижня порції serratus anterior явно не поділені. Анатомічно м'яз починається від 2 до 8/9 ребер і прикріплюється до медіального краю лопатки.

Основні функції полягають у висуванні лопатки вперед, її зовнішньому обертанні та стабілізації. Верхня порція додатково сприяє стабілізації верхнього кута лопатки та незначному її підніманню

Верхня порція m. serratus anterior безпосередньо не пов'язана з ключицею, але при абдукції плеча, лопатка починає рух одночасно з ключицею (від  $30^\circ$  до  $60^\circ$  абдукції) (рис. 4, в). На початковому етапі руху лопатки, вектор дії сили верхніх пучків m. serratus anterior направлений у бік ключиці,



Максимальний кут підйому ключиці



Максимальний кут ротації лопатки

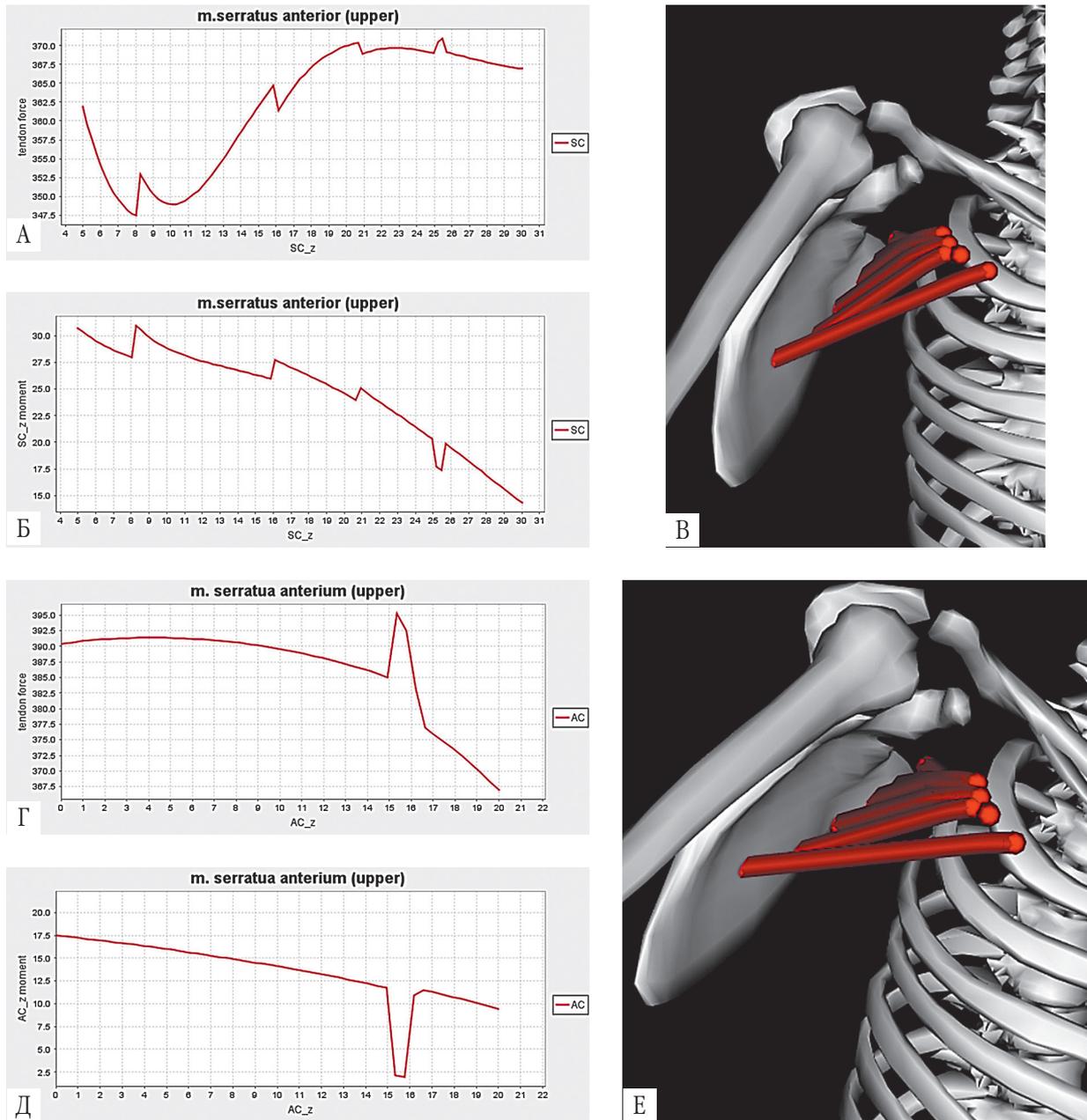
**Рис. 3.** Робота ромбовидних м'язів при відведенні плеча: сила м'язів (А) та крутні моменти (Б) при роботі грудинно-ключичного (SC\_z) суглоба та сила м'язів (В) та крутних моментів (Г) надплечово-ключичного (AC\_z) суглоба

тобто вони практично не працюють, що обумовлює зниження сумарної сили до кута підйому ключиці у 10°, що відповідає приблизно куту 35–40° абдукції плеча. В подальшому, при русі ключиці пучки *m. serratus anterior* включаються в роботу, сила зростає до 370 Н при куті підйому ключиці 20–25° (рис. 4, а). На цьому етапі в рух включається лопатка, яка продовжує натягування м'язів, але вектор дії сили стає майже горизонтальним (рис. 4, г), що призводить до постійного навантаження м'яза (сила стабілізації лопатки). При куті підйому плеча близько до 80–85° і куті ротації лопатки 35–40°, вектор дії сили м'яза змінюється, в роботу стабілізації залучаються інші м'язи, сила *m. serratus anterior* поступово знижується.

Крутний момент грудинно-ключичного суглоба, який створює *m. serratus anterior* має низхідний характер – від 30 Нм до 15 Нм (рис. 4, б), для надплечово-ключичного суглоба крутний момент ще менший, і також зменшується по мірі абдукції плеча від 17,5 Нм до 10 Нм. При роботі *m. serratus anterior* поступово залучає відповідні пучки м'яза, що обумовлює зубоподібний вигляд графіків.

Верхня порція *m. serratus anterior lower* специфічні функції в координації з грудинно-ключичним (SC) та надплечово-ключичним (AC) суглобами. Вона менш активна в порівнянні з нижньою порцією під час абдукції, але її функція полягає в стабілізації та координації рухів лопатки.

Нижня порція *m. serratus anterior* кріпиться до



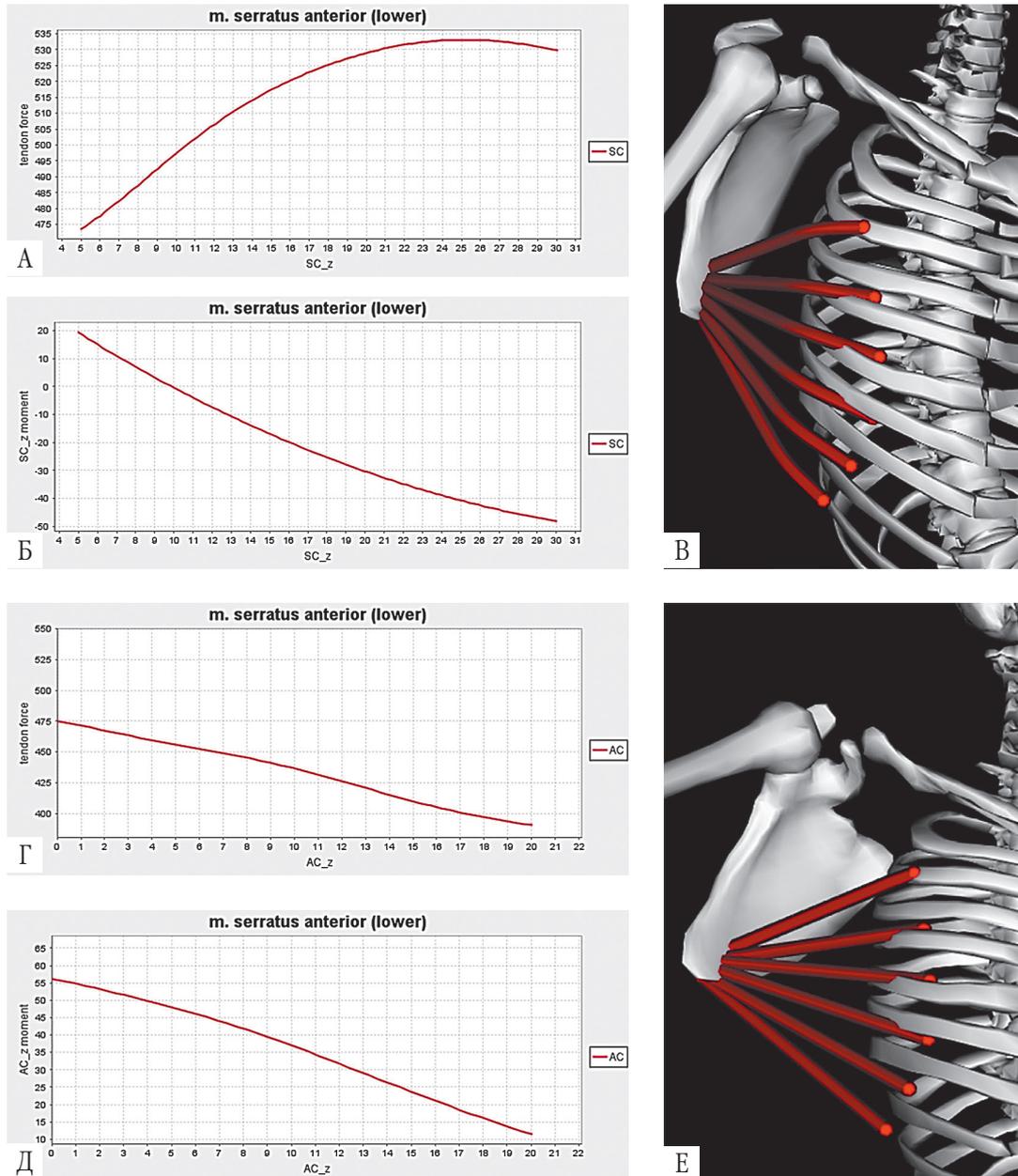
**Рис. 4.** Функція *m. serratus anterior* (upper) при абдукції плеча до 90° сила м'яза (А) та крутний момент (Б) при роботі грудинно-ключичного суглоба (SC) ілюстрація максимального кута підйому ключиці в моделі (В) сила м'яза (Г) та крутний момент (Д) при роботі надплечово-ключичного суглоба (AC) ілюстрація максимального кута підйому лопатки в моделі (Е)

нижніх країв лопатки та ребер, не має безпосереднього з'єднання з ключицею, але робота починається з руху лопатки одночасно з підйомом ключиці при куті абдукції 30°.

Виходячи з даних моделювання, основне завдання *m. serratus anterior* (lower) полягає в стабілізації лопатки, тобто її притискання до ребер. При підйомі ключиці нижня порція *m. serratus anterior* розвиває силу для утримання лопатки від 475 Н до 535 Н на максимумі від 20° (рис. 5, а). Далі м'язи утримують лопатку від подальшої її елевації без

помітної зміни сили. Рух лопатки майже не впливає на силу *m. serratus anterior* (рис. 5, г) через те, що за ретракцією відповідають інші, більш сильні м'язи, такі як *m. trapezius* та *mm. rhomboid*.

Крутний момент грудинно-ключичного суглоба, який створює нижня порція *m. serratus anterior* зростає після 10° підйому ключиці (40–45° абдукції плеча) і сягає 50 Нм (рис. 5, б). Крутний момент надплечово-лопаткового суглоба падає, відповідно зменшенню сили *m. serratus anterior* при ротації лопатки (рис. 5, д).



**Рис. 5.** Функція *m. serratus anterior* (lower) при абдукції плеча до 90° сила м'яза (А) та крутний момент (Б) при роботі грудинно-ключичного суглоба (SC) В) ілюстрація максимального кута підйому ключиці в моделі сила м'яза (Г) та крутний момент (Д) при роботі надплечово-ключичного суглоба (AC) Е) ілюстрація максимального кута підйому лопатки в моделі

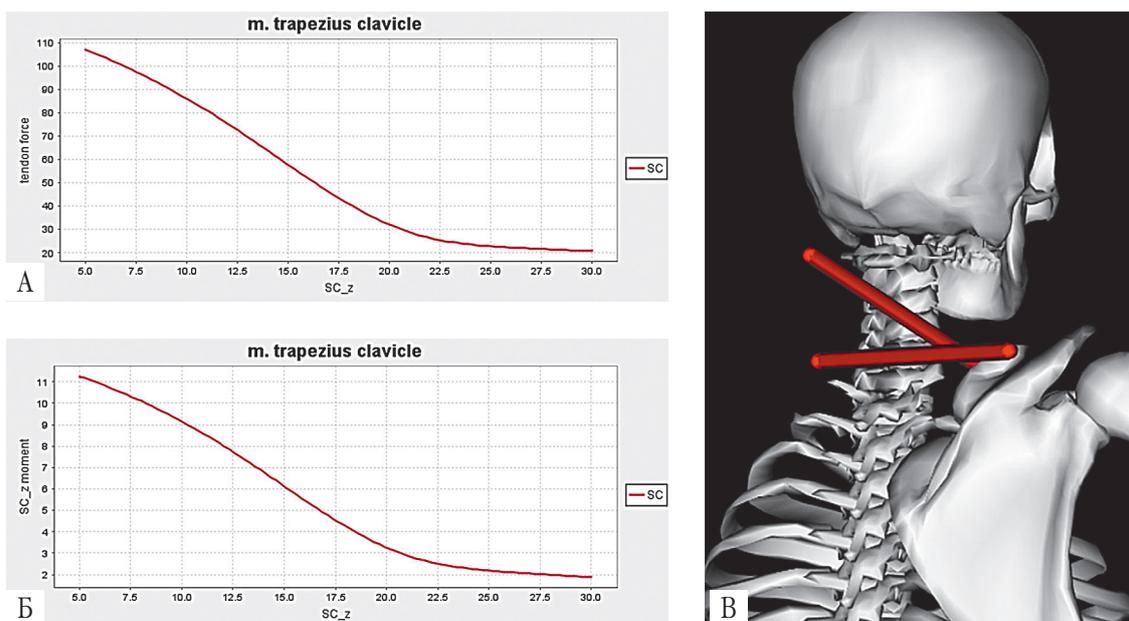
**Трапецієподібний м'яз** складається з трьох частин: верхньої, середньої і нижньої. При відведенні плеча до 90° основну роль відіграють верхня і середня частини м'яза.

**Верхня частина трапецієвидного м'язу (*m. trapezius clavicle* – аббревіатура в моделі)** кріпиться до **латеральної третини ключиці** та акроміона лопатки. Цей м'яз піднімає лопатку виключно через надплечово-ключичний суглоб, тобто до кута 30° ключиці чи 60° абдукції плеча.

При відведенні плеча сила верхньої частини трапецієподібного м'язу зменшується (рис. 6, а) через

**зміну кута прикладання сили, тобто** лінія дії м'яза (вектор сили) стає менш перпендикулярною до осі обертання ключиці, що знижує ефективність моменту сили (рис. 6, б). Крім того, на початкових етапах відведення значна частина роботи припадає на інші м'язи, зокрема надостьовий та дельтоподібний м'яз (*m. deltoideus*). *Trapezius clavicle* забезпечує підйом плеча до кута приблизно 60°.

Для подальшого руху необхідна дія надплечово-ключичного суглоба, в дії якого бере участь середня і нижня частини – *m. trapezius scapulae* (рис. 7)



**Рис. 6.** Функція *m. trapezius clavicle* при абдукції плеча до  $90^\circ$  сила м'яза (А) та крутний момент (Б) при роботі грудинно-ключичного суглоба (SC) В) ілюстрація максимального кута підйому ключиці в моделі

Початок руху ключиці супроводжується збільшенням сумарної сили *m. trapezius scapulae* до 1150 Н при куті ротації ключиці біля  $10^\circ$  (кут абдукції плеча біля  $40^\circ$ ). При подальшому підйомі ключиці сила м'яза поступово знижується до 970 Н (рис. 7, а). Це пов'язано з тим, що деякі порції м'яза змінюють свою орієнтацію, що призводить до зміни кута дії вектора сили (рис. 7, в).

Ротація лопатки призводить до того, що м'яз виконує роботу по ретракції лопатки, і сила знову зростає – з 970 Н до 1150 Н при куті абдукції плеча  $90^\circ$  (рис. 7, г, е).

Крутні моменти зростають як при підйомі ключиці (рис. 7, б), так і при ротації лопатки (рис. 7, д), направлені в протилежний бік від дії вектора сили.

Для *m. trapezius scapulae* можна помітити хвилястий характер зміни сили – спочатку наростання до кута абдукції плеча до  $45^\circ$ , незначне спадання при абдукції близько  $60^\circ$ , і знову збільшення при подальшому відведенні плеча.

М'яз, що піднімає лопатку (*m. levator scapulae*), відіграє важливу роль у русі та стабілізації лопатки під час відведення плеча до  $90^\circ$ . Хоча його основна функція пов'язана з підняттям лопатки, він також бере участь у синергії з іншими м'язами плечового поясу, зокрема трапецієподібним м'язом (*m. trapezius*), для забезпечення правильного руху та стабільності лопатки.

При підйомі ключиці спостерігаємо збільшення сили *m. levator scapulae* до 200 Н тільки на початку її руху. Подальший підйом супроводжується виключно підтриманням сили на цьому рівні (рис. 8, а). Подальша абдукція плеча, коли в робо-

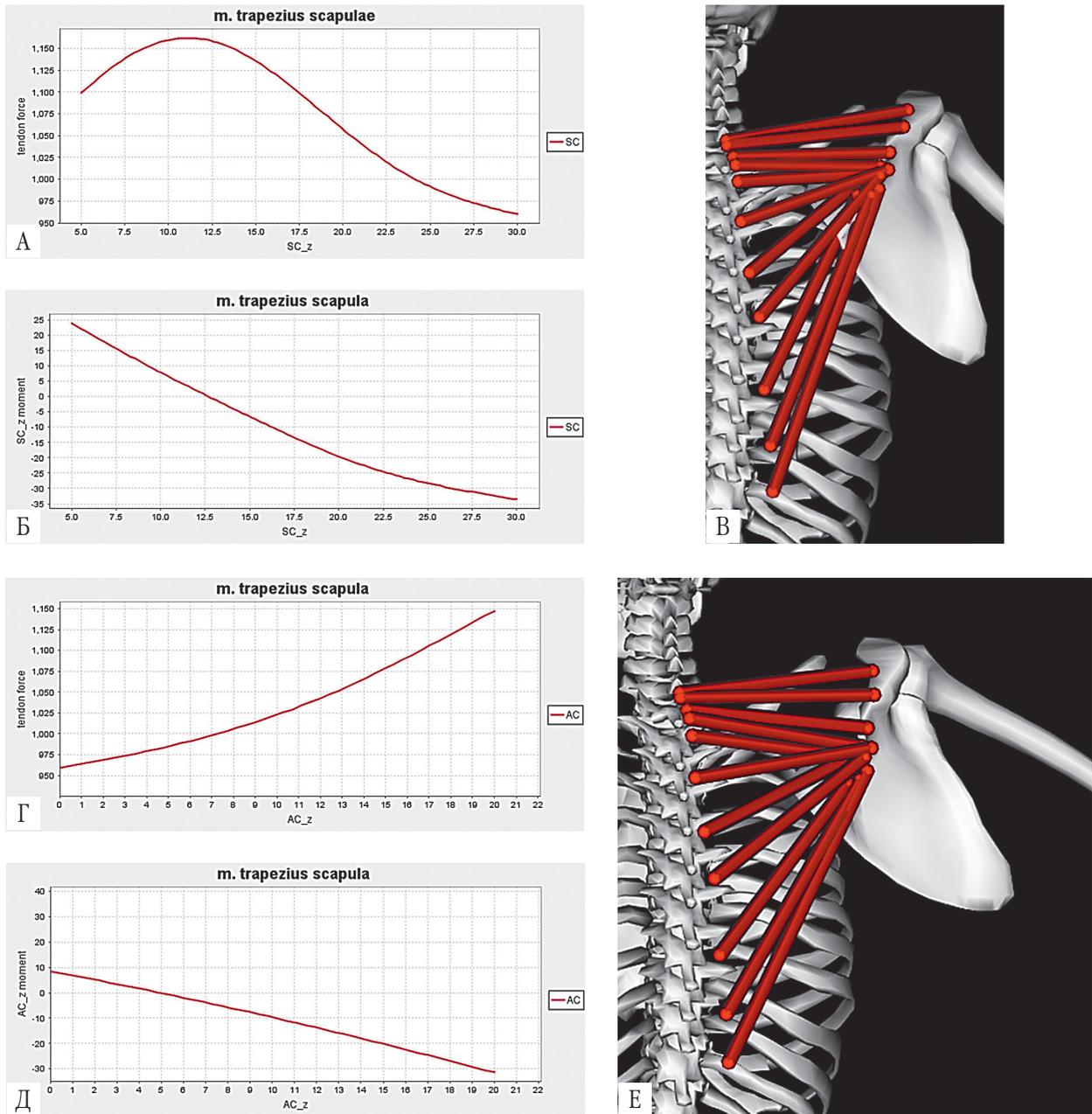
ту залучається лопатка, спостерігається незначне зменшення сили – приблизно до кута ротації  $10^\circ$ , що відповідає зоні одночасного руху грудинно-ключичного і надплечово-ключичного суглобів. В подальшому ротація лопатки потребує збільшення сили *m. levator scapulae* від 160 Н до 190 Н (рис. 8, г). Відповідно крутні моменти відображають зміну сили м'яза – рис. 8, б, д.

*M. levator scapulae* працює разом із *m. trapezius scapula* для стабілізації верхнього кута лопатки. У той час як верхня частина трапецієподібного м'яза тягне акроміон вгору, *m. levator scapulae* утримує медіальний край і верхній кут лопатки, забезпечуючи контрольовану ротацію. Він також працює у зв'язці з ромбоподібними м'язами (*mm. rhomboidei*), які допомагають стабілізувати лопатку в горизонтальній площині.

## Обговорення

При абдукції плеча до  $90^\circ$  м'язи, що відповідають за рух і стабілізацію ключиці та лопатки відіграють ключову роль, забезпечуючи скоординовану роботу плечового поясу в рамках скапулогуморального ритму. Основні м'язи, які приймають участь у стабілізації лопатки – трапецієподібний м'яз (*m. trapezius*), м'яз, що піднімає лопатку (*m. levator scapulae*), передній зубчастий (*m. serratus anterior*) та ромбоподібні м'язи (*mm. rhomboidei*). Їхня робота синергічно пов'язана з грудинно-ключичним і акроміально-ключичним суглобами.

На початку відведення плеча (від 0 до  $30^\circ$ )



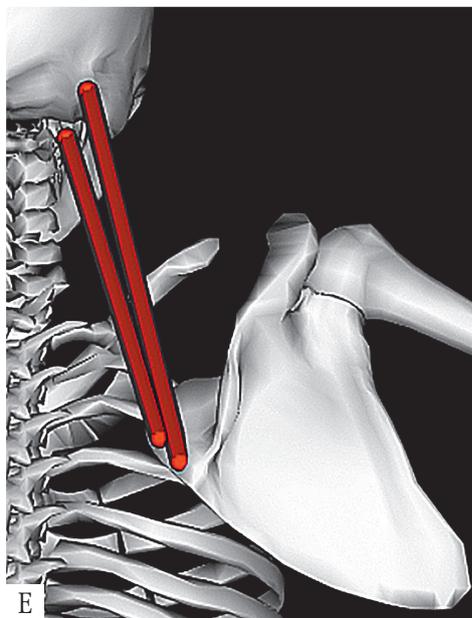
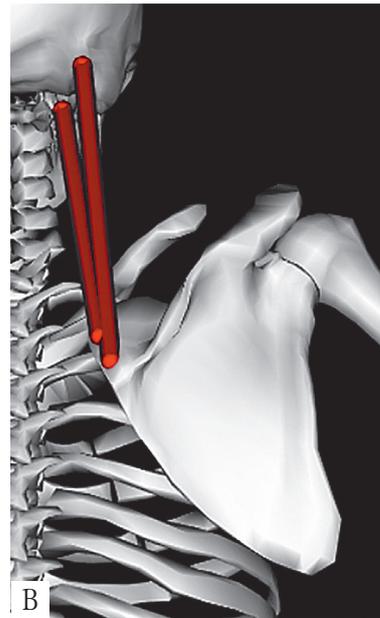
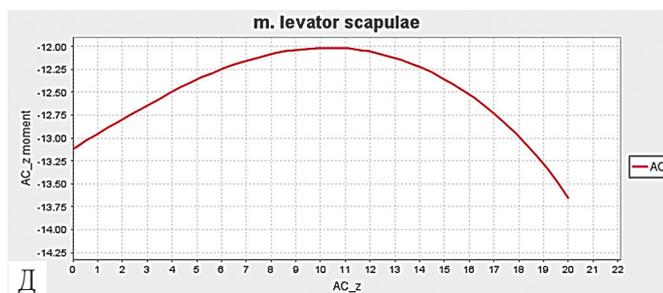
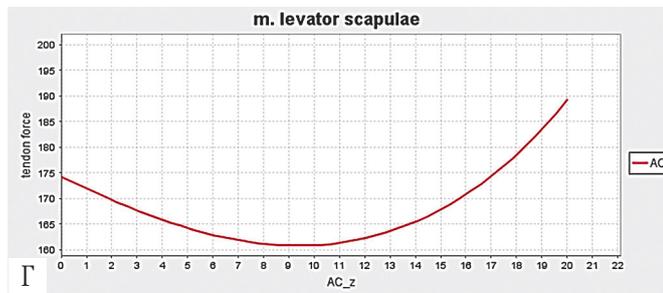
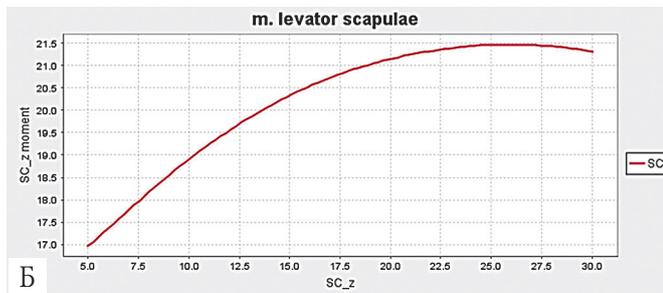
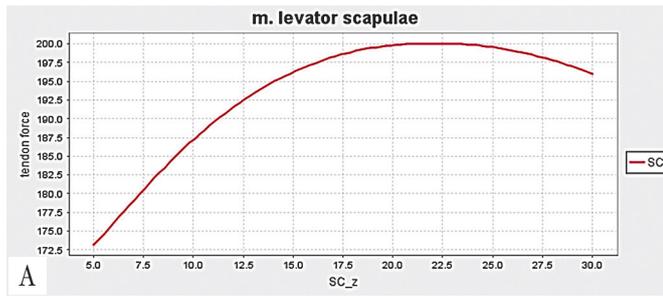
**Рис. 7.** Функція *m. trapezius scapulae* при абдукції плеча до 90° сила м'яза (А) та крутний момент (Б) при роботі грудинно-ключичного суглоба (SC) В) ілюстрація максимального кута підйому ключиці в моделі сила м'яза (Г) та крутний момент (Д) при роботі надплечово-ключичного суглоба (AC) Е) ілюстрація максимального кута підйому лопатки в моделі

основне навантаження припадає на дельтоподібний, надостовий м'язи та м'язи ротаторної манжети плечового суглоба. Трапецієподібний м'яз (верхня і середня частини) і *m. levator scapulae* стабілізують лопатку і ключицю, готуючи їх до ротації. Тобто м'язи виконують виключно роль стабілізації лопатки.

При подальшому відведенні від 30° до 90°, ротація лопатки вгору стає домінуючою. Верхня і нижня частини трапецієподібного м'яза та передній зубчастий м'яз беруть активну участь у рота-

ції лопатки, а середня частина трапецієподібного і ромбоподібні м'язи забезпечують її стабільність.

Розглянуті аспекти роботи м'язів і суглобів при відведенні плеча дають підстави для передбачення наслідків при комбінованому переломі ключиці і верхнього краю лопатки, який суттєво порушує біомеханіку плечового поясу, обмежуючи відведення плеча через ураження ключових кісткових і суглобових структур. Перелом ключиці, особливо в латеральній третині, порушує стабільність грудинно-ключичного суглоба, зменшуючи здатність



**Рис. 8.** Функція *m. levator scapulae* при абдукції плеча до 90° сила м'яза (А) та крутний момент (Б) при роботі грудинно-ключичного суглоба (SC) В) ілюстрація максимального кута підйому ключиці в моделі сила м'яза (Г) та крутний момент (Д) при роботі надплечово-ключичного суглоба (AC) еЕ) ілюстрація максимального кута підйому лопатки в моделі

ключиці підніматися (15–20°) і здійснювати ротацію назад (20–35°), що обмежує передачу руху до лопатки. Перелом верхнього краю лопатки, зокрема акроміона чи верхнього кута, порушує ротацію лопатки вгору (30–40°) в акроміально-ключичному суглобі, що є критичним для скапулогуморального ритму (2:1). Це призводить до нестабільності плечового поясу, зниження амплітуди відведення та компенсаторних рухів, таких як надмірне підняття плечового поясу.

М'язи, що відповідають за рух ключиці та ло-

патки, зазнають функціональних порушень. Верхня частина трапецієподібного м'яза (*m. trapezius clavicle*) втрачає ефективність через зміщення точок прикріплення на ключиці чи акроміоні (*m. trapezius scapula*), що обмежує її здатність підняти ключицю та здійснювати ротацію лопатки. М'яз, що піднімає лопатку (*m. levator scapulae*), через ураження верхнього кута лопатки не може стабілізувати її, а передній зубчастий м'яз (*m. serratus anterior*) і нижня частина трапецієподібного м'яза втрачають здатність формувати

силову пару для ротації лопатки вгору. Середня частина трапецієподібного м'яза та ромбоподібні м'язи (mm. rhomboidei) не можуть ефективно стабілізувати лопатку в горизонтальній площині, що посилює порушення скапулогуморального ритму та обмежує відведення плеча.

## Висновки

В результаті моделювання роботи м'язів, відповідальних за рух лопатки та ключиці було визначено порядок залучення суглобів і відповідних м'язів для забезпечення абдукції плеча до 90°. Отримані дані дозволили визначити можливі порушення функціонування плечового поясу при ушкодженні ключиці чи лопатки, або при їх комбінованій травмі.

## References

1. Cowan PT, Mudreac A, Varacallo MA. Anatomy, Back, Scapula. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK531475/>
2. Contemori S, Panichi R, Biscarini A. Effects of scapular retraction/protraction position and scapular elevation on shoulder girdle muscle activity during glenohumeral abduction. *Hum Mov Sci*. 2019;64:55-66. doi: 10.1016/j.humov.2019.01.005
3. Yabata K, Fukui T. Characteristics of the scapula movement during shoulder elevation depend on posture. *J Phys Ther Sci*. 2022;34(7):478-484. doi: 10.1589/jpts.34.478.
4. Тяжелов ОА, Органов ВВ, Гончарова ЛД. Исследование работы мышц вращательной манжеты плеча на статической модели. *Травма*. 2005;6(4):407-412. Tyazhe-

- lov OA, Organov VV, Goncharova LD. Study of the function of the rotator cuff muscles on a static model. *Trauma*. 2005;6(4):407-412.[in Russian]
5. Chadwick E, Blana D, Kirsch R, van den Bogert A. Real-time simulation of three-dimensional shoulder girdle and arm dynamics. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2014;61(7):1947-56. doi:10.1109/TBME.2014.2309727.
6. Saul KR, Hu X, Goehler CM, Vidt ME, Daly M, Velisar A, et al. Benchmarking of dynamic simulation predictions in two software platforms using an upper limb musculoskeletal model. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*. 2015;18:1445-1458.
7. Paine R, Voight ML. The role of the scapula. *Int J Sports Phys Ther*. 2013;8(5):617-29
8. Delp SL, Anderson FC, Arnold AS, Loan P, Habib A, John CT, et al. OpenSim: open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2007;54(11):1940-50. doi:10.1109/TBME.2007.901024.
9. Seth A, Matias R, Veloso AP, Delp SL. A Biomechanical Model of the Scapulothoracic Joint to Accurately Capture Scapular Kinematics during Shoulder Movements. *PLoS One*. 2016;11(1):e0141028. doi: 10.1371/journal.pone.0141028.
10. Долгополов ОВ. Хірургічне лікування ушкодженнь ротаторної манжети плеча. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата медичних наук. Київ: Інститут травматології та ортопедії Академії медичних наук України; 2003. 167 с. Dolgoplov OV. Surgical treatment of rotator cuff injuries of the shoulder. PhD dissertation (Medicine). Kyiv: Institute of Traumatology and Orthopedics of the Academy of Medical Sciences of Ukraine; 2003. 167 p. [in Ukrainian]
11. Кравченко ДД, Страфун ОС, Суворов ВЛ, Карпінська ОД, Карпінський МЮ. Моделювання роботи м'язів плечового суглоба при відведенні верхньої кінцівки. *Terra Orthopaedica*. 2025;2(125):17-26. doi:10.37647/2786-7595-2025-125-2-17-26.
- Kravchenko DD, Strafun OS, Suvorov VL, Karpinska OD, Karpinsky MYu. Modeling of shoulder joint muscle function during upper limb abduction. *Terra Orthop*. 2025;2(125):17-26. doi:10.37647/2786-7595-2025-125-2-17-26. [in Ukrainian]

## Modeling of Scapular and Clavicular Muscle Function During Upper Limb Abduction

Dolgoplov O.V.<sup>1</sup>, Bezruchenko S.O.<sup>1</sup>✉, Saliuk R.V.<sup>1</sup>, Suvorov V.L.<sup>1</sup>, Karpinska O.D.<sup>2</sup>, Karpinskyi M.Yu.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>SI «Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMS of Ukraine», Kyiv, Ukraine  
<sup>2</sup>SI «Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology of NAMS of Ukraine», Kharkiv, Ukraine

**Summary. Introduction.** Modeling combined movements, such as upper limb abduction involving multiple joints and muscle groups, requires advanced mathematical tools; therefore, it is often represented as a sequence of motions in the glenohumeral, sternoclavicular, and acromioclavicular joints. Although this approach does not fully replicate anatomical movement, it provides valuable insight into the magnitude of muscle forces generated during limb abduction. **Objective.** This study aimed to analyze the muscle forces responsible for scapular and clavicular movement during shoulder abduction. **Materials and Methods.** Modeling was performed using the OpenSim software package based on the DAS3 model. The model included six joints:

acromioclavicular, sternoclavicular, glenohumeral, humeroulnar, humeroradial, and radiocarpal. A total of 138 muscles were included. Movements in the sternoclavicular and acromioclavicular joints were simulated. The abduction of the upper limb was analyzed within a range of  $0^\circ$  to  $90^\circ$ . **Results.** The sternoclavicular joint becomes active when shoulder abduction reaches approximately  $30^\circ$ . The force of the rhomboid muscles increases to 400 N at a clavicular elevation angle of approximately  $20\text{--}25^\circ$ . Subsequently, scapular rotation affects the rhomboid muscles, reaching a maximum force of 700 N at full shoulder abduction, with the torque increasing to  $32\text{ N}\cdot\text{m}$ . At the onset of scapular movement, the force vector of the upper fibers of the serratus anterior is directed toward the clavicle, causing a decrease in total force up to an elevation angle of  $10^\circ$ . With further clavicular movement, serratus anterior force increases to 370 N at an elevation angle of  $20\text{--}25^\circ$ , while the generated torque decreases from  $30\text{ N}\cdot\text{m}$  to  $15\text{ N}\cdot\text{m}$ . During clavicular elevation, the lower portion of the serratus anterior generates forces ranging from 475 N to 535 N at a maximum angle of  $20^\circ$  to stabilize the scapula. The corresponding torque increases to  $50\text{ N}\cdot\text{m}$  after  $10^\circ$  of clavicular elevation. The onset of the clavicular movement is accompanied by an increase in the total trapezius muscle force to 1150 N at a clavicular rotation angle of  $10^\circ$ . With further elevation, the muscle force decreases to 970 N. During scapular rotation, trapezius muscle force increases again to 1150 N at  $90^\circ$  of shoulder abduction. The levator scapulae muscle reaches a force of 200 N only at the initial stage of clavicular movement, while scapular rotation requires an increase in muscle force up to 160 N. **Conclusions.** Modeling the function of muscles responsible for scapular and clavicular movement made it possible to determine the sequence of involvement of joints and corresponding muscles required to achieve shoulder abduction up to  $90^\circ$ . The obtained data allowed identification of potential functional disorders of the shoulder girdle in cases of clavicular or scapular injury, or combined trauma.

**Keywords:** modeling; clavicle; scapula; muscle force; upper limb abduction.