

УДК 611.711:616-053.6:004

В.С. Коноплицький, О.Ф. Ткач, Ю.Є. Коробко

Математична модель тривимірного визначення ступеня деформації хребта при підлітковому ідіопатичному сколіозі

Вінницький національний медичний університет імені М.І. Пирогова, Україна

Paediatric Surgery (Ukraine). 2025. 1(86): 65-72. doi: 10.15574/PS.2025.1(86).6572

For citation: Konoplytskyi VS, Tkach OF, Korobko YuYe. (2025). Mathematical model of three-dimensional determination of the degree of spine deformation in adolescent idiopathic scoliosis. Paediatric Surgery (Ukraine). 1(86): 65-72. doi: 10.15574/PS.2025.1(86).6572.

Відомо, що в Україні кожна четверта дитина має порушення постави. За даними Центру громадського здоров'я МОЗ України, у 2019 р. у 99 467 дітей виявлено підлітковий ідіопатичний сколіоз різного ступеня, а за даними Центру медичної статистики МОЗ України, лише під час профілактичних оглядів у 2020 р. виявлено 92 322 дитини піком 0-17 років із підлітковим ідіопатичним сколіозом, серед яких 45 553 становили хлопчики.

Мета – провести комплексну оцінку виразності деформації хребта в сагітальній, фронтальній та аксіальних площинах з урахуванням первинної сколіотичної кривизни в пацієнтів із підлітковим ідіопатичним сколіозом.

Матеріали і методи. У створенні математичної моделі враховано морфометричні дані, отримані шляхом лінійних вимірів на рентгенограмах у 45 хворих обох статей, із попередньо виставленими діагнозами сколіозу I–II ст. Вік хворих становив від 10 до 18 років (середній вік – $15,2 \pm 0,45$ року). Серед загальної кількості пацієнтів лівобічну патологію виявлено у 21 хворого, а правобічну – у 24 дітей. Величини обраних анатомічних чинників виміряно одномоментно на двох двовимірних рентгенологічних зображеннях хребта у фронтальній і сагітальній проекціях.

Результати. Доведено, що візуальний аналіз просторової орієнтації хребців при сколіотичній деформації в підлітків на основі двовимірних рентгенограм зазвичай оманливий і не дає достовірних даних, оскільки результати плоских зображень не здатні показати справжні фронтальні та бічні лінійні параметри анатомічних об'єктів.

Висновки. Розроблена і запропонована математична модель визначення справжньої величини викривлення хребта при підлітковому ідіопатичному сколіозі шляхом 3D-реконструктивного моделювання рентгенологічних двовимірних зображень у фронтальній і сагітальній проекціях дає змогу прогнозувати перебіг патології залежно від локалізації боку формування патології.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Ключові слова: підлітковий ідіопатичний сколіоз, математичне моделювання, деформація, викривлення хребта, кут Cobb, 3D-зображення, рентгенограми, діагностика, лікування, прогнозування перебігу.

Mathematical model of three-dimensional determination of the degree of spine deformation in adolescent idiopathic scoliosis

V.S. Konoplytskyi, O.F. Tkach, YuYe. Korobko*National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine*

It is known that every fourth child in Ukraine has a posture disorder. According to the Public Health Center of the Ministry of Health of Ukraine, in 2019, 99,467 children were diagnosed with adolescent idiopathic scoliosis of varying degrees, and according to the Center for Medical Statistics of the Ministry of Health of Ukraine, only during preventive examinations in 2020, 92,322 children with adolescent idiopathic scoliosis were diagnosed with a peak of 0–17 years, among whom 45,553 were boys.

Aim – to make comprehensive assessment of the severity of spinal deformity in the sagittal, frontal, and axial planes, taking into account the primary scoliotic curvature in patients with adolescent idiopathic scoliosis.

Original articles. Orthopedics

Materials and methods. When creating a mathematical model, morphometric data obtained by linear measurements on radiographs in 45 patients of both sexes, with previously diagnosed scoliosis of the I-II degree, were taken into account. The age of the patients ranged from 10 to 18 years (mean age 15.2 ± 0.45 years). Among the total number of patients, left-sided pathology was observed in 21 patients, and right-sided scoliosis was observed in 24 children, respectively. Measurements of the values of the selected anatomical factors were performed simultaneously on two two-dimensional X-ray images of the spine in the frontal and sagittal projections.

Results. It has been proven that visual analysis of the spatial orientation of the vertebrae in scoliotic deformation in adolescents based on two-dimensional radiographs is usually misleading and does not provide reliable data, since the results of flat images are unable to show the true frontal and lateral linear parameters of anatomical objects.

Conclusions. A mathematical model has been developed and proposed for determining the true magnitude of spinal curvature in adolescent idiopathic scoliosis by 3D reconstructive modeling of two-dimensional X-ray images in frontal and sagittal projections, which allows predicting the course of the pathology depending on the localization of the side of pathology formation.

The authors declare no conflict of interest.

Keywords: adolescent idiopathic scoliosis, mathematical modeling, deformation, spinal curvature, Cobb angle, 3D-image, radiographs, diagnostics, treatment, prognosis.

Вступ

Підлітковий ідіопатичний сколіоз (ПІС), за останніми сучасними уявленнями, – це захворювання всього організму, основним проявом якого є тривимірна (3D) деформація хребта в сагітальній, фронтальній і горизонтальній площинах, а також латеральне відхилення хребта й ротація хребців у фронтальній площині, що спостерігається в 0,47–5,2% педіатричної популяції, і в декілька разів частіше уражує дівчат порівняно з хлопчиками. Статеве співвідношення залежить від величини кута Cobb, за його значень 10–20° міжстатеве співвідношення становить 1,3:1, за 20–30° – 5,4:1, а за >30° – 7,0:1 і більше [6]. Термін ПІС уперше в клінічну практику введено Клейнбергом у 1922 р. Хоча виділяють кілька типів сколіозу, ПІС є найпоширенішим його типом, який є підґрунтям у формуванні сколіотичної хвороби, досягаючи 80% від загальної кількості патології, та передбачувано залежить від географічної широти проживання хворих [9].

Відомо, що в Україні кожна четверта дитина має порушення постави. За даними Центру громадського здоров'я МОЗ України, у 2019 р. у 99 467 дітей виявлено ПІС різного ступеня, а за даними Центру медичної статистики МОЗ України, лише під час профілактичних оглядів у 2020 р. виявлено 92 322 дитини піком 0–17 років із ПІС, серед яких 45 553 становили хлопчики [9,17].

Патофізіологічні та етіологічні чинники формування ПІС і досі залишаються остаточно нез'ясованими. Так, вивчення морфологічних змін тіл хребців і міжхребцевих дисків у пацієнтів із ПІС на основі звичайних двовимірних рентгенограм свідчить, що диски мають більш клиноподібну форму порівняно з тілами хребців, а це, відповідно до закону Hueter–Volkmann's (1862–1873), засвідчує вторинність деформації тіл хребців і пояснює природу ротаційної їхньої деформації [18].

Дослідження останніх років свідчать, що найбільш важливими чинниками прогресування сколіотичної хвороби, пов'язаними з природним перебігом патології, є стать пацієнта, характер вигину хребта і фізіологічна зрілість дитини. Точніше, ризик прогресування залежить від напрямку викривлення і статі хворого [7]. У прогностичному сенсі існують спостереження, що дівчата з правобічним грудним викривленням >10° за Cobb і ті, які не досягли менархе, підлягають високому ризику подальшого прогресування ПІС, тоді як представники чоловічої статі із правобічним поперековим згином хребта максимально схильні до прогресування викривлення хребта. З іншого боку, через свою слабку тенденцію до прогресування лівобічні грудні викривлення хребта зазвичай мають більш доброякісний характер [20].

Незважаючи на удавану простоту, діагностування ПІС і його ступеня виразності становить певні труднощі при різних локалізаціях патології та віку пацієнтів, через різницю в кореляції між кутом Cobb, який обчислюється за параметрами рентгенологічних зображень хребта і даними клінічних обстежень, у т.ч. за тестом Адамса. Точність та адекватність раннього встановлення діагнозу ПІС безпосередньо залежить від співвідношення кута нахилу тулуба і кута Cobb як прийнятих критеріїв діагностування [11].

Після того, як Cobb запропонував метод визначення осевого зміщення хребців у цифровому еквіваленті на основі рентгенологічних зображень у коронарній площині, дослідження ступеня обертання хребців почали проводити за допомогою 2D-рентгенограм, 3D-моделювання кісток, растростереографії, комп'ютерної томографії (КТ) тощо [2].

Величина 3D-деформації хребта при ПІС специфічна для кожного пацієнта з огляду на кількість і довжину ділянок вигину, ступінь їхнього повороту

та величини кута кривизни навколо осі, тому адекватне якісне та кількісне її визначення можливе лише з урахуванням показників у різних площинах: фронтальній, сагітальній та обов'язково в аксіальній [4,18].

Дослідженнями І.Е. Ketenci та співавт. (2018) доведено, що мінімальні значення ротаційних кутів спостерігаються на Th_{12} , при цьому величини кутових показників на увігнутому боці дещо вищі, ніж по вигнутому, із максимальною різницею в показниках на рівні Th_7-Th_8 , що пов'язано з інтравертебральною ротацією апікального відділу [10,12].

Комп'ютерна томографія є одним із найкращих методів візуалізації кісткових структур, а з урахуванням тривимірної деформації справжня осьова площа кожного хребця являє собою площину нахилу. Для вимірювання параметрів у цих косих площинах КТ-скани аналізують у вигляді мультиплощинних тонких (0,6 мм) зрізів по всій довжині грудного та поперекового відділів хребта. Однак суттєвим обмеженням подібних діагностичних методик є відсутність (складність) вимірів у сагітальній площині та порівнянь із нормальними показниками, на тлі того, що диски роблять більший внесок у 3D-деформації порівняно з кістковими структурами [18].

Серед основних проблем ППС є складність прогнозування подальшого перебігу патології після первинного індивідуального звернення пацієнта з таким діагнозом [16].

Приблизно 10% діагностованих ППС потребує консервативного лікування, а 0,1–0,3%, за умов перевищення кута $Cobb$ 40° , – оперативної корекції [6,14].

Значна частота поширеності ППС у педіатричній популяції в сучасних умовах розвитку суспільства і існуючих особливостях навколишнього середовища, недостатня поширеність, а іноді недоступність до об'єктивних методів діагностування справжнього ступеня викривлення хребта, домінуючим серед яких двомірне рентгенологічне дослідження та пов'язані з цим причинно-наслідкові зв'язки невірної і/або несвоєчасно обраної тактики, що сприяє в подальшому незадовільним наслідкам лікування і погіршенню якості життя, зумовлює значну актуальність такого напрямку досліджень у пошуку нових доступних і високоінформативних методів діагностики цієї складної патології.

Мета дослідження – провести комплексну оцінку виразності деформації хребта в сагітальній, фронтальній та аксіальних площинах з урахуванням первинної сколіотичної кривизни в пацієнтів із підлітковим ідіопатичним сколіозом.

Матеріали та методи дослідження

Об'єкт дослідження – математична модель визначення справжньої величини викривлення хребта при ППС шляхом 3D-реконструктивного моделювання рентгенологічних двовимірних зображень у фронтальній і сагітальній проекціях.

У створенні математичної моделі враховано морфометричні дані, отримані шляхом лінійних вимірів на рентгенограмах у 45 хворих обох статей, із попередньо виставленими діагнозами сколіозу І–ІІ ст. Вік хворих становив від 10 до 18 років (середній вік – $15,2 \pm 0,45$ року), що, за визначенням Організації Об'єднаних Націй, відповідає підлітковому періоду. Серед загальної кількості пацієнтів лівобічну патологію виявлено у 21 хворого, а правобічну – у 24 дітей.

Величини обраних анатомічних чинників вимірювано одномоментно на двох двовимірних рентгенологічних зображеннях хребта у фронтальній і сагітальній проекціях. Визначені для кожної проекції реперні точки проекційно локалізувалися відповідно на верхній замикальній пластинці хребця Th_2 і нижній замикальній пластинці Th_{11} . Отже, в усіх клінічних спостереженнях дистанція виміру ступеня деформації хребта обмежувалася дугою між хребцями Th_2-Th_{11} .

Усі рентгенологічні обстеження виконано на одному і тому самому цифровому рентгенапараті за однакового (стандартизованого) проекційного збільшення, одним і тим самим фахівцем. Для зменшення можливих похибок і розбіжностей зображень усі знімки виконано у вертикальному положенні пацієнта (стоячи) у двох проекціях: фронтальній і сагітальній, у ранкові години [3].

Результати дослідження та їх обговорення

Основи методології та етапи створення математичної моделі. У нормі в положенні стоячи всі хребці піддаються осьовому стисканню, а крім того, певні ділянки хребта підлягають додатковим різноспрямованим навантаженням зсуву, залежно від їхньої просторової орієнтації. Доведено, що задньоспрямовані навантаження сприяють тому, що цей сегмент хребта стає менш ротаційно стабільним порівняно із сегментами, які зазнають переднього зсувного навантаження [21] (рис. 1).

З урахуванням такого положення речей, закону Hueter–Volkmann's і того, що ППС є тривимірною деформацією хребта, діагностичні заходи щодо визначення його ступеня деформації не мають базуватися лише на даних рентгенологічних досліджень у фронтальній площині. Слід враховувати дані патологічних змін і в інших проекціях, зважаючи на

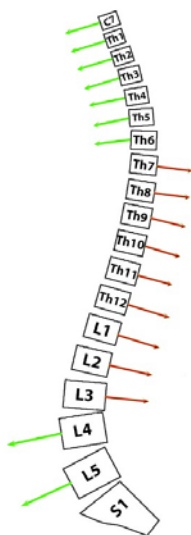


Рис. 1. Схема ділянок хребта, які за його вертикального положення зазнають задньоспрямованих (стрілки червоного кольору) та передньоспрямованих (стрілки зеленого кольору) зсувних навантажень

те, що фронтальні і сагітальні деформації взаємопов'язані, тому зміни у фронтальній площині викликають патологічні деформації в сагітальній. Водночас сагітальні спинно-тазові деформації при ПІС безпосередньо пов'язані з ротаційними зміщеннями хребців, що у своїй патологічній сукупності визначають величину кривизни кута Cobb [13]. Важливим у цьому сенсі є формування при ПІС деформацій грудної клітки, від її недорозвитку до реберних вигинів у вигляді горба, який виникає внаслідок ротаційного компонента деформації хребта [7,15,21].

Оскільки сколіоз являє собою деформацію у трьох площинах, для встановлення його ступеня необхідне кількісне визначення сколіотичного (фронтальна площина), кіфотичного (сагітального) і ротаційного (аксіального) компонентів деформації [5].

Площина в тривимірному Евклідовому просторі визначається за допомогою трьох неколінеарних точок.

Доведено, що візуальний аналіз просторової орієнтації хребців при сколіотичній деформації в підлітків на основі двовимірних рентгенограм зазвичай оманливий і не дає достовірних даних, оскільки результати плоских зображень не здатні показати справжні фронтальні (коронарні) і бічні (сагітальні) лінійні параметри анатомічних об'єктів (відповідного хребця) [1].

Для обчислення ступеня сколіотичної деформації хребта з урахуванням ротаційного зміщення хребців побудовано систему координат їхніх певних реперних точок у двох площинах: сагітальній і фронтальній.

На відміну від деяких дослідників, які для вимірювання обертання хребців навколо своєї вертикальної осі використовують показник ширини тіла хребця в ділянці $1/2$ його висоти, нами за базову основу у визначенні кута нахилу кожного окремого хребця обрано площину поверхонь їх замикальних пластинок [2,20]. Такий вибір є інтуїтивно зрозумілим та об'єктивно обґрунтованим, оскільки замикальні пластинки, що є активними ділянками зон росту хребців у дітей підліткового віку, які найбільш чітко візуалізуються на рентгенограмах у пацієнтів такого вікового періоду, дозволяючи об'єктивно визначити середину тіла хребця, що значно допомагає побудувати схему розрахункового обчислення параметрів такого анатомічного об'єкта (рис. 2).

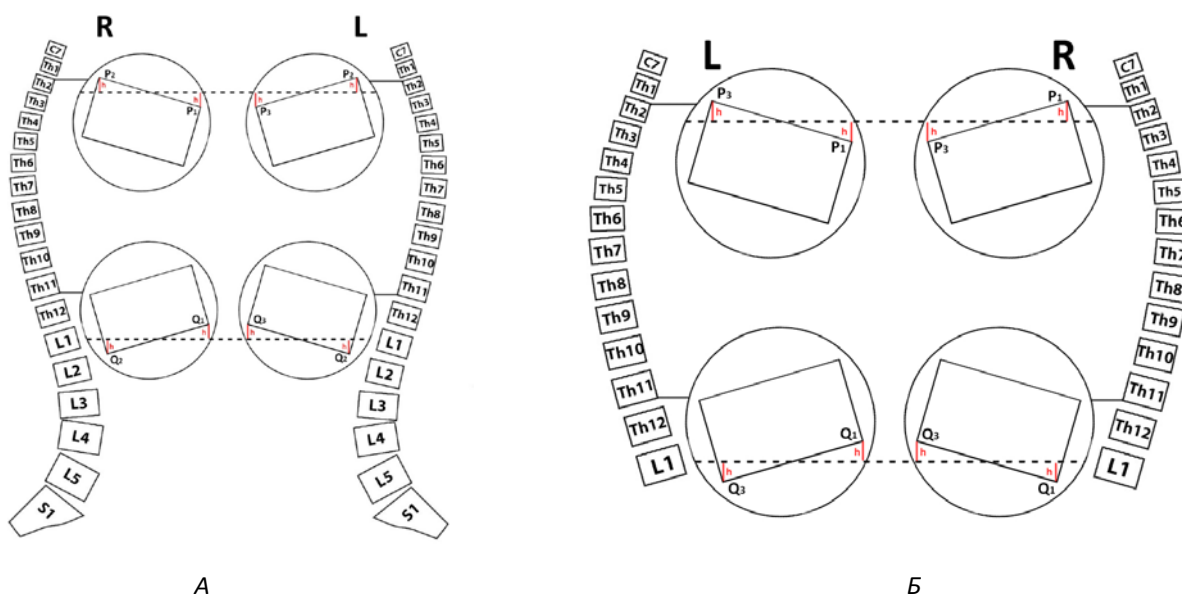


Рис. 2. Схема визначення координат реперних точок хребців у сагітальній (А) і фронтальній (Б) площинах

Верхня межа розрахункової моделі дуги сколіотичної деформації хребта схематично розташована чітко по площині верхньої частини замикальної пластинки Th_2 (згідно з рентгенологічним зображенням хребта в сагітальній і фронтальній проекціях у положенні стоячи), відповідно точки P_1, P_2, P_3 , а нижня межа дуги чітко відповідає площині нижньої замикальної пластинки, відповідно точки Q_1, Q_2, Q_3 .

Для морфометричного виміру величин нахилу хребців у відповідній площині, через центр верхньої (Th_2) і нижньої (Th_{11}) замикальних пластинок, $1/2$ ширини тіла хребця, проводять горизонтальні лінії. Величина h , яка дорівнює відстані від горизонтальної лінії до перпендикулярно визначеної відповідної реперної точки, складає лінійну величину кута нахилу хребця на верхній і нижній межах сколіотичної дуги.

В основу формування тривимірної методики обчислення ступеня сколіотичної деформації хребта покладена схема Cobb. Відповідно до схеми Cobb, після визначення просторової локалізації площини Th_2 і Th_{11} , кут їхнього перетину (α) відповідає справжній 3D-величині сколіотичної деформації хребта (рис. 3).

За умови, якщо відомі координати трьох точок на поверхні хребця, які не розташовані на одній прямій, можна провести єдину площину.

Отримано рівняння такої площини, що проходить через точки $P_1(x_1, y_1, z_1); P_2(x_2, y_2, z_2); P_3(x_3, y_3, z_3)$. Площина проходить через точку P_1 і має таке рівняння:

$$A(x - x_1) + B(y - y_1) + C(z - z_1) = 0,$$

де A, B, C – координати нормального вектора.

Площина, яка досліджувалася, проходить через точку P_2 , тоді має виконуватися рівність:

$$A(x_2 - x_1) + B(y_2 - y_1) + C(z_2 - z_1) = 0.$$

Точка P_3 також лежить на площині, її координати задовольняють рівнянню:

$$A(x_3 - x_1) + B(y_3 - y_1) + C(z_3 - z_1) = 0.$$

У трьох рівняннях, що містять три невідомі параметри – координати нормального вектора шуканої площини. Ці рівняння є лінійними відносно невідомих A, B, C . Тоді маємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} A(x - x_1) + B(y - y_1) + C(z - z_1) = 0 \\ A(x_2 - x_1) + B(y_2 - y_1) + C(z_2 - z_1) = 0 \\ A(x_3 - x_1) + B(y_3 - y_1) + C(z_3 - z_1) = 0 \end{cases}$$

Розв'язавши систему лінійних алгебраїчних рівнянь, отримано рівняння площини, що проходить через три точки на поверхні хребця.

Наприклад, для правобічного сколіозу координати точок на верхній поверхні хребця Th_2 такі:

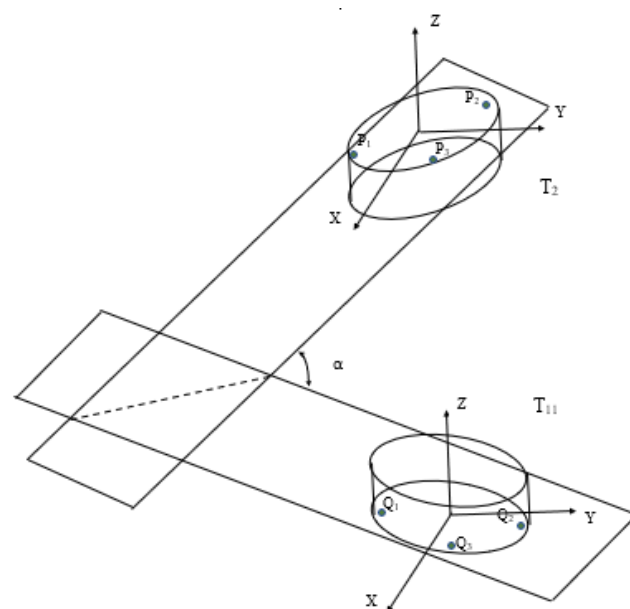


Рис. 3. Визначення величини кута перетину двох площин при сколіотичній деформації хребта

$P_1(4, 25; 0; -3); P_2(-4, 25; 0; 3); P_3(0; 3, 25; 0)$. Рівняння площини по трьох точках має такий вигляд:

$$12x + 17z = 0. \quad (1)$$

Для нижньої поверхні хребця Th_{11} координати трьох точок такі: $Q_1(6, 75; 0; 3); Q_2(-6, 75; 0; -3); Q_3(0; 4, 75; 0)$. Рівняння площини по трьох точках має такий вигляд:

$$4x - 9z = 0. \quad (2)$$

Для обчислення кута між двома площинами (рис. 4), які задані такими рівняннями:

$$A_1x + B_1y + C_1z = 0;$$

$$A_2x + B_2y + C_2z = 0.$$

використано таку формулу:

$$\alpha = \arccos \left(\frac{|A_1A_2 + B_1B_2 + C_1C_2|}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2} \sqrt{A_2^2 + B_2^2 + C_2^2}} \right).$$

Для правобічного сколіозу відносно рівнянь (1) і (2) розрахований кут перетину двох площин має таке значення $\alpha = 59^\circ$.

Далі за цією технологією проаналізовано кути перетину площин для кіфозу, правобічного і лівобічного сколіозів.

Наступним етапом дослідження є створення прогностичної моделі значення ступеня сколіотичної деформації хребта залежно від нахилу хребців Th_2 і Th_{11} у фронтальній і сагітальній площинах, тобто з урахуванням ротаційного зміщення відповідного хребця.

Окремо розраховано показники для правобічного і лівобічного патологічного процесу.

Таблиця 1

Референтні значення величини h при лівобічному і правобічному сколіозах у фронтальній і сагітальній проєкціях

Рівень хребця	Точка виміру	Значення h (мм)		Напрямок виміру величини h
		Min	Max	
Патологія та проєкція дослідження	Правобічний сколіоз. Фронтальна проєкція рентгенологічного зображення			
Th ₂	P ₁	0	3	Вгору від горизонтальної лінії
Th ₁₁	Q ₁	0	-3	Вниз від горизонтальної лінії
Патологія та проєкція дослідження	Лівобічний сколіоз. Фронтальна проєкція рентгенологічного зображення			
Th ₂	P ₃	0	3	Вгору від горизонтальної лінії
Th ₁₁	Q ₃	0	-7	Вниз від горизонтальної лінії
Патологія та проєкція дослідження	Правобічний/лівобічний сколіоз. Сагітальна проєкція рентгенологічного зображення			
Th ₂	P ₂	1	4	Вгору від горизонтальної лінії
Th ₁₁	Q ₂	-3	-5	Вниз від горизонтальної лінії

Таблиця 2

Розподіл ступеня сколіозу відповідно до класифікаційних ознак за величиною кута Cobb

Ступінь класифікаційних патологічних проявів	Величина викривлення хребта за кутом Cobb
Норма	0°
Сколіотична постава	$1-3^\circ$
Сколіоз I ст.	$4-10^\circ$
Сколіоз II ст.	$11-30^\circ$
Сколіоз III ст.	$31-60^\circ$
Сколіоз IV ст.	61° та більше

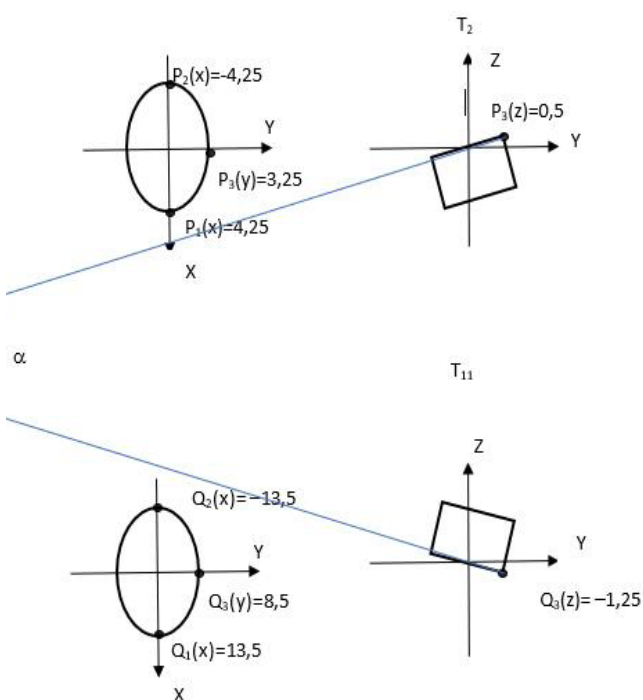


Рис. 4. Моделювання 3D-схеми визначення α залежно від просторової локалізації реперних точок Th_2 і Th_{11}

Прогностичну модель визначення ступеня сколіотичної деформації побудовано шляхом розроблення окремих лінійних рівнянь залежності положення реперних точок від величини h , що визначає величину справжнього ротаційного зміщення хребців Th_2 і Th_{11} у відповідній площині при правобічному/лівобічному сколіозах.

Для цього в окрему таблицю зведено мінімальні й максимальні референтні значення h основних реперних точок хребців Th_2 і Th_{11} з урахуванням напрямку (знаку «+» або «-») виміру показника від рівня горизонтальної лінії, проведеної через центр замикальної пластинки (верхньої або нижньої) відповідного хребця (табл. 1).

Прогностична оцінка величини деформації хребта корелювала з класифікаційними показниками сучасної градації ступеня сколіозу та рекомендаціями SOSORT за кутом Cobb (табл. 2) [8].

Серед когорти хворих, залучених до дослідження, максимальна величина кута за Cobb становила 26° , що згідно з розподілом за класифікаційними ознаками відповідало II ст. патології.

На основі отриманих у процесі клінічних досліджень реферативних значень величин h при правобічному і лівобічному сколіозі і за класифікаційного розподілу патології залежно від величини кута Cobb побудовано відповідні графіки лінійної залежності стосовно хребців Th_2 і Th_{11} , які були трансформовані в лінійні рівняння (рис. 5–8).

Розв'язавши лінійні рівняння, отримано такі прогностичні значення перебігу патології.

Відносно правобічного сколіозу, то вплив величини зміщення (нахилу) хребця Th_2 у 1,47 рази перевищує аналогічне зміщення хребця Th_{11} . Крім того, при максимальних величинах нахилу Th_2 визначається III ступінь сколіозу.

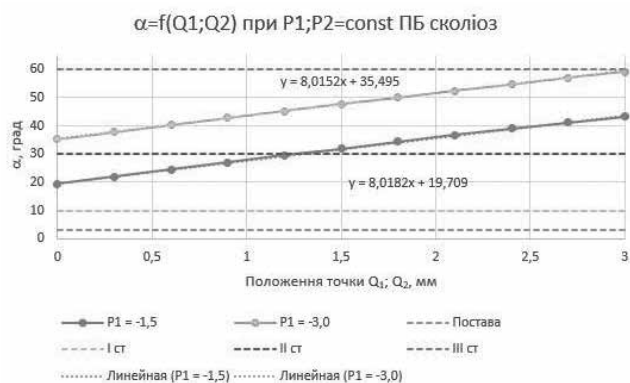


Рис. 5. Лінійний графік залежності кута нахилу Th_2 від величини h при правобічному сколіозі

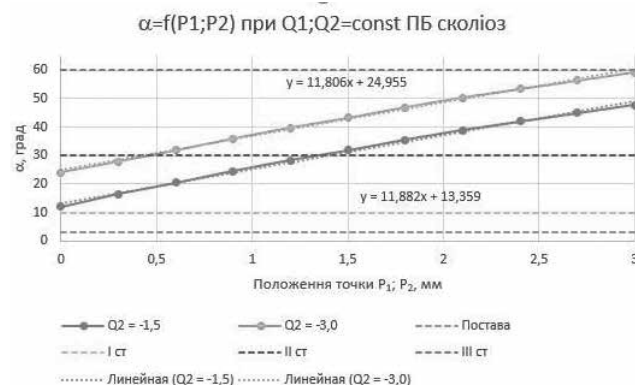


Рис. 6. Лінійний графік залежності кута нахилу Th_{11} від величини h при правобічному сколіозі

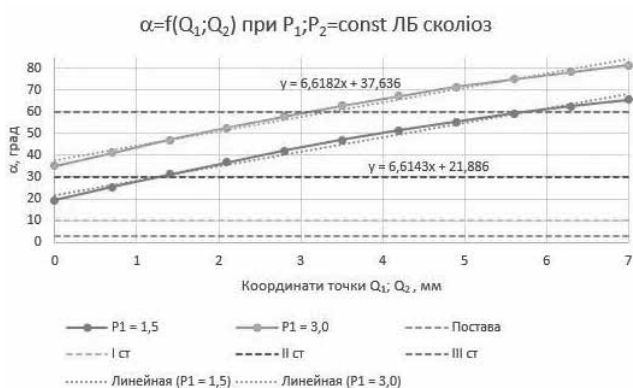


Рис. 7. Лінійний графік залежності кута нахилу Th_2 від величини h при лівобічному сколіозі

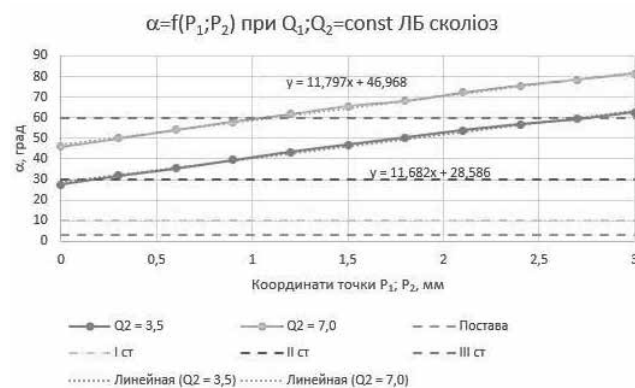


Рис. 8. Лінійний графік залежності кута нахилу Th_{11} від величини h при лівобічному сколіозі

Стосовно лівобічного сколіозу, за отриманими даними, при лівобічному сколіозі очевидним є факт впливу на зміщення хребця Th_2 у 1,78 раза більше, ніж на величину зміщення Th_{11} . Крім того, результати рішення лінійних рівнянь переконливо засвідчують, що лівобічний сколіоз має більш виразну тенденцію до збільшення ступеня патології. Також отримані нами в процесі створення математичної моделі та її обчислення дані пояснюють причинно-наслідкові зв'язки вірогідності більшої частоти наявності та більш значної виразності реберного горба саме при лівобічному сколіозі.

Переважає величини кута зміщення хребця Th_2 при лівобічному сколіозі, на наш погляд, прогностично засвідчує більш високий прихований потенціал можливої вразливості саме лівобічної деформації хребта, що слід обов'язково враховувати як на всіх етапах лікування, так і під час проведення диспансеризації пацієнтів.

Висновки

Розроблена і запропонована математична модель визначення справжньої величини викривлення хребта при ПІС шляхом 3D-реконструктивного моделювання рентгенологічних двовимірних зобра-

жень у фронтальній і сагітальній проєкціях дає змогу враховувати компоненти деформацію хребців за всіма просторовими векторами: сколіотичним, кіфотичним та аксіальним (ротаційним).

Запропонована розрахункова математична модель визначення ступеня викривлення хребта при ідіопатичному сколіозі в дітей можлива до застосування як при правобічній, так і при лівобічній локалізації патології незалежно від її ступеня виразності.

Створення і розв'язання лінійних рівнянь взаємної залежності кутів нахилу хребців Th_2 і Th_{11} при правобічному/лівобічному ПІС дає змогу визначити, що при правобічній патології збільшення зміщення в 1,47 раза притаманне хребцю Th_2 порівняно із Th_{11} , а при лівобічній локалізації патологічного процесу зміщення Th_2 відносно Th_{11} збільшується в 1,78 раза, тобто на 17,42%.

Розроблена модель тривимірного визначення ступеня деформації хребта при ПІС допомагає прогнозувати перебіг патології залежно від локалізації боку формування патології. Так, при правобічному сколіозі, за умови максимальних величин нахилу Th_2 , визначається III ступінь захворювання. Розв'язування відповідних лінійних рівнянь засвідчує більш деструктивні (виразні) прояви при

Original articles. Orthopedics

лівобічній локалізації патології, у т.ч. характерною є більша частота і виразність реберного горба.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

References/Література

1. Aksekili MAE, Çağlar C, Bozer M, Demir P. (2022). Morphological analysis of thoracolumbar spine pedicles in adolescent idiopathic scoliosis. *J Turk Spinal Surg.* 33(3): 83-90.
2. Atmaca H, Inanmaz ME, Bal E, Caliskan I, Kose KC. (2014). Axial plane analysis of Lenke 1A adolescent idiopathic scoliosis as an aid to identify curve characteristics. *The Spine Journal.* 14(10): 2425-2433. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2014.02.015>.
3. Brink RC, Colo D, Schlösser TP, Vincken KL, van Stralen M, Hui SC et al. (2017). Upright, prone, and supine spinal morphology and alignment in adolescent idiopathic scoliosis. *Scoliosis and spinal disorders.* 12: 1-8. <https://doi.org/10.1186/s13013-017-0111-5>.
4. Brink RC, Schlösser TP, van Stralen M, Vincken KL, Krut MC, Hui SC et al. (2018). Anterior-posterior length discrepancy of the spinal column in adolescent idiopathic scoliosis – a 3D CT study. *The Spine Journal.* 18(12): 2259-2265. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2018.05.005>.
5. Chen H, Schlösser TP, Brink RC, Colo D, Van Stralen M, Shi L et al. (2017). The height-width-depth ratios of the intervertebral discs and vertebral bodies in adolescent idiopathic scoliosis vs controls in a Chinese population. *Scientific Reports.* 7(1): 46448. <https://doi.org/10.1038/srep46448>.
6. Frank S, Frank M, Frank H. (2020). Vidnovliuválne likuvannia idiopatichnoho skoliozu metodom manualnoi terapii. *World science.* 1; 1(53): 51-57. [Франк С, Фран М, Франк Г. (2020). Відновлювальне лікування ідіопатичного сколіозу методом мануальної терапії. *World science.* 1; 1(53): 51-57]. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/31012020/6896.
7. Grivas TB, Vynichakis G, Chandrinou M, Mazioti C, Papagiani D et al. (2021). Morphology, development and deformation of the spine in mild and moderate scoliosis: are changes in the spine primary or secondary? *Journal of Clinical Medicine.* 10(24): 5901. <https://doi.org/10.3390/jcm10245901>.
8. Hama TV, Hryhus IM, Orel IO, Hirak AM. (2022). Fizychna terapiia ditei vikom 10-12 rokiv zi skoliozom II stupenia. *Rehabilitation and Recreation.* (11): 10-17. [Гамма ТВ, Григус ІМ, Орел ІО, Гірак АМ. (2022). Фізична терапія дітей віком 10-12 років зі сколіозом II ступеня. *Rehabilitation and Recreation.* (11): 10-17]. <https://doi.org/10.32782/2522-1795.2022.11.1>.
9. Huitema G, Willems PC, van Rhijn L, Kleijnen J, Shaffrey CI et al. (1996). Anterior versus posterior spinal correction and fusion for adolescent idiopathic scoliosis. *Cochrane Database of Systematic Reviews.* 2014(9).
10. Ketenci İE, Yanik HS, Erdem Ş. (2018). Pedicle morphometry of thoracic and lumbar vertebrae in adolescent idiopathic scoliosis. *Medeniyet Medical Journal.* 33(2). <https://doi.org/10.5222/mmj.2018.01336>.
11. Kluszczynski M, Mosler D, Wasik J. (2022). Morphological differences in scoliosis curvatures as a cause of difficulties in its early detection based on angle of trunk inclination. *BMC Musculoskeletal Disorders.* 23(1): 948. <https://doi.org/10.1186/s12891-022-05878-6>.
12. Larson AN, Polly Jr DW, Diamond B, Ledonio C, Richards III BS, Emans JB et al. (2014). Does higher anchor density result in increased curve correction and improved clinical outcomes in adolescent idiopathic scoliosis? *Spine.* 39(7): 571-578. <https://doi.org/10.1097/brs.0000000000000204>.
13. Mak T, Cheung PWH, Zhang T, Cheung JPY. (2021). Patterns of coronal and sagittal deformities in adolescent idiopathic scoliosis. *BMC Musculoskeletal Disorders.* 22: 1-10. <https://doi.org/10.1186/s12891-020-03937-4>.
14. Mezentsev AO, Petrenko DE, Demchenko DO. (2023). Analysis of the results of surgical treatment in idiopathic thoracic scoliosis with Cobb angle 80°-100°. *Paediatric Surgery (Ukraine).* 2(79): 28-34. [Мезенцев АО, Петренко ДЄ, Демченко ДО. (2023). Аналіз результатів лікування грудного ідіопатичного сколіозу з куттом Cobb 80-100°. *Хірургія дитячого віку (Україна).* 2(79): 28-34]. <https://doi.org/10.15574/ps.2023.79.28>.
15. Mezentsev AO, Petrenko DE, Demchenko DO. (2024). The results of using thoracoplasty in adolescent idiopathic thoracic scoliosis. *Paediatric Surgery (Ukraine).* 3(84): 80-85. [Мезенцев АО, Петренко ДЄ, Демченко ДО. (2024). Результати застосування торакопластики у хворих на підлітковий ідіопатичний сколіоз. *Хірургія дитячого віку (Україна).* 3(84): 80-85]. [https://doi.org/10.15574/ps.2024.3\(84\).8085](https://doi.org/10.15574/ps.2024.3(84).8085).
16. Nault ML, Mac-Thiong JM, Roy-Beaudry M, Turgeon I, Deguise J et al. (2014). Three-dimensional spinal morphology can differentiate between progressive and nonprogressive patients with adolescent idiopathic scoliosis at the initial presentation: a prospective study. *Spine.* 39(10): E601-E606.
17. Poliarush I, Vasylenko Ye, Kobinskyi O. (2022). Ohliad suchasnykh pidkhodiv do zastosuvannia zasobiv fizychnoi terapii pry skoliotichnii khvorobi u pidlitkiv. *Sportyvna medytsyna, fizychna terapiia ta erhoterapiia.* (2): 125-131. [Полярush І, Василенко Є, Кобінський О. (2022). Огляд сучасних підходів до застосування засобів фізичної терапії при сколіотичній хворобі у підлітків. *Спортивна медицина, фізична терапія та ерготерапія.* (2): 125-131].
18. Schlösser TP, van Stralen M, Brink RC, Chu WC, Lam TP, Vincken KL et al. (2014). Three-dimensional characterization of torsion and asymmetry of the intervertebral discs versus vertebral bodies in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine.* 39(19): E1159-E1166. <https://doi.org/10.1097/brs.0000000000000467>.
19. Schlösser TP, van Stralen M, Chu WC, Lam TP, Ng BK, Vincken KL et al. (2016). Anterior overgrowth in primary curves, compensatory curves and junctional segments in adolescent idiopathic scoliosis. *PloS one.* 11(7): e0160267. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160267>.
20. Soucacos PN, Zacharis K, Gelalis J, Soultanis K, Kalos N, Beris A et al. (1998). Assessment of curve progression in idiopathic scoliosis. *European Spine Journal.* 7: 270-277. <https://doi.org/10.1007/s005860050074>.
21. Thakur A, Heyer JH, Wong E, Hillstrom HJ, Groisser B, Page K et al. (2022). The effects of adolescent idiopathic scoliosis on axial rotation of the spine: a study of twisting using surface topography. *Children.* 9(5): 670. <https://doi.org/10.3390/children9050670>.

Відомості про авторів:

Коноплицький Віктор Сергійович – д.мед.н., проф., зав. каф. дитячої хірургії ВНМУ ім. М.І. Пирогова. Адреса: м. Вінниця, вул. Пирогова, 56. <https://orcid.org/0000-0001-9525-1547>.

Ткач Олег Федорович – аспірант каф. дитячої хірургії ВНМУ ім. М.І. Пирогова. Адреса: м. Вінниця, вул. Пирогова, 56. <https://orcid.org/0009-0003-0671-9542>.

Коробко Юрій Євгенійович – д.філос., асистент каф. дитячої хірургії ВНМУ ім. М.І. Пирогова. Адреса: м. Вінниця, вул. Пирогова, 56. <https://orcid.org/0000-0002-3299-878X>.

Стаття надійшла до редакції 19.12.2024 р., прийнята до друку 18.03.2025 р.