

УДК 616.61-003.7-053.2-089.8

Р.А. Наконечний, А.Й. Наконечний

Прогностична цінність 3D-волюметрії та денситометрії конкрементів при плануванні екстракорпоральної ударно-хвильової літотрипсії у дітей

ДНТ «Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького», Україна

Paediatric Surgery (Ukraine). 2026. 2(91): 83-88. doi: 10.15574/PS.2026.2(91).8388

For citation: Nakonechnyy RA, Nakonechnyi AY. (2026). Predictive value of 3D volumetry and stone densitometry in planning extracorporeal shock wave lithotripsy in children. Paediatric Surgery (Ukraine). 2(91): 83-88. doi: 10.15574/PS.2026.2(91).8388.

Екстракорпоральна ударно-хвильова літотрипсія (ЕУХЛ) залишається методом вибору при уролітіазі в дітей. Проте частота досягнення статусу «stone free» коливається в широких межах, оскільки традиційне 2D-вимірювання діаметра зазвичай не відображає реальних характеристик конкременту.

Мета – визначити прогностичну цінність та порогові рівні 3D-об'єму і щільності конкрементів як факторів успішності ЕУХЛ у дітей.

Матеріали та методи. Ретроспективно проаналізували ефективність лікування 72 пацієнтів віком від 1 до 17 років. За даними комп'ютерно-томографічної (КТ) сегментації (3D Slicer) розраховували 3D-об'єм (V), середню (HUmеan) та максимальну (HUmах) щільності конкременту. У статистичному дослідженні застосували ROC (Receiver Operating Characteristic) аналіз із розрахунком площі під кривою (AUC).

Результати. Найбільшу прогностичну цінність демонструє 3D-об'єм конкременту – AUC=0,829. Його оптимальний поріг відсікання (OC) склав >184,9 мм³ при специфічності 92,7% у прогнозуванні невдачі. Максимальна щільність конкременту також зарекомендувала себе значущим предиктором – OC>934 HU, AUC=0,704. Натомість середня щільність каменю та вік пацієнта не виявили достовірної прогностичної значущості.

Висновки. 3D-волюметрія є більш точним інструментом планування ЕУХЛ, аніж лінійні вимірювання. Порогові значення об'єму (184,9 мм³) та щільності конкременту (934 HU) дозволяють об'єктивізувати вибір між дистанційною і контактною літотрипсією, мінімізуючи кількість марних ЕУХЛ втручань під загальним знечуженням у дітей.

Дослідження виконано відповідно до принципів Гельсінської декларації. На проведення досліджень отримано інформовану згоду батьків (або їхніх опікунів), дітей.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Ключові слова: сечокам'яна хвороба, екстракорпоральна ударно-хвильова літотрипсія, 3D-волюметрія, комп'ютерно-томографічна денситометрія, ROC-аналіз, діти.

Predictive value of 3D volumetry and stone densitometry in planning extracorporeal shock wave lithotripsy in children

R.A. Nakonechnyy, A.Y. Nakonechnyi

SNPE «Danylo Halytskyi Lviv National Medical University», Ukraine

Extracorporeal shock wave lithotripsy (ESWL) remains the method of choice for urolithiasis in children. However, the stone-free rate (SFR) varies widely, as traditional 2D measurement of stone diameter usually does not reflect the true characteristics of the calculus.

Aim – to determine the predictive accuracy and cut-off values of 3D volume and densitometric parameters as predictors of ESWL efficacy in children.

Original articles. Urology and gynecology

Materials and methods. The treatment outcomes of 72 patients aged 1 to 17 years were retrospectively analyzed. Based on computed tomography (CT) segmentation data (3D Slicer), the 3D volume (V), mean (HUmean), and maximum (HUmax) stone densities were calculated. ROC (Receiver Operating Characteristic) analysis was used for the statistical evaluation with calculation of the area under the curve (AUC).

Results. The 3D stone volume demonstrated the highest predictive value (AUC=0.829). Its optimal cut-off (OC) value was >184.9 mm³ with a specificity of 92.7% in predicting failure. The maximum stone density also proved to be a significant predictor (OC>934 HU; AUC=0.704). In contrast, the mean stone density and patient age did not show statistically significant predictive value.

Conclusions. 3D volumetry is a more accurate tool for planning ESWL than linear measurements. The OC values of volume (184.9 mm³) and stone density (934 HU) allow for an objective choice between extracorporeal and contact lithotripsy, minimizing the number of ineffective ESWL interventions under general anesthesia in children.

The study was conducted in accordance with the Helsinki Declaration principles. Informed consent was obtained from the parents (or their legal guardians) and children participating in the study.

No conflict of interests was declared by the authors.

Keywords: urolithiasis, extracorporeal shock wave lithotripsy, 3D volumetry, computed tomography densitometry, ROC analysis, children.

Вступ

Сечокам'яна хвороба (СКХ) у дітей є актуальною та динамічною проблемою. Кількість хворих на уролітіаз прогресивно зростає і, зокрема, на 4% за останнє десятиліття [18]. Завдяки неінвазивності екстракорпоральна ударно-хвильова літотрипсія (ЕУХЛ) стала «золотим стандартом» лікування конкрементів невеликих розмірів. Проте, відсоток повного звільнення сечових шляхів від конкрементів (статус «stone free») після першого сеансу ЕУХЛ продовжує коливатися в широких межах від 60% до 90% [10,11,19]. Невдалі спроби фрагментації конкременту призводять до повторних наркозів, додаткового променевого навантаження та ризику пошкодження ниркової паренхіми.

Традиційне передопераційне планування способу лікування СКХ ґрунтується на вимірюванні максимального лінійного розміру конкременту (діаметра) за даними 2D-зображень, отриманих під час ультразвукового дослідження (УЗД), оглядової рентгенографії або комп'ютерній томографії (КТ). Однак лінійні розміри часто недооцінюють реальний об'єм конкременту, особливо у випадках його складної конфігурації [1]. Сучасні можливості постпроцесингової обробки КТ-зображень дозволяють виконувати точну 3D-реконструкцію, що може стати ключем до персоналізованого вибору тактики лікування [6,12].

Мета дослідження – визначити прогностичну цінність та порогові рівні 3D-об'єму і щільності конкрементів як чинників успішності ЕУХЛ у дітей.

Матеріали та методи досліджень

Проведено ретроспективний аналіз ефективності ЕУХЛ у 72 дітей віком від 1 до 17 років, які перебували на лікуванні в урологічному відділі лікарні Святого Миколая м. Львова з 2023 по 2025 роки.

Пацієнтів розподілили на дві групи. Група 1 охоплювала 55 дітей, в яких після одноразового

сеансу ЕУХЛ не виявлено конкрементів у сечовидільних шляхах (negative / stone free). Групу 2 становили 17 пацієнтів, у яких діагностували резидуальні фрагменти конкременту (positive / residual fragments).

Критерії включення до дослідження: це одиничний конкремент нирки або сечоводу в пацієнтів, яким перед операцією виконували нативну КТ та один сеанс ЕУХЛ.

За даними безконтрастної КТ за допомогою відкритого програмного забезпечення 3D Slicer проводили сегментацію та напівавтоматичне виділення тіла конкременту. На основі побудованої 3D-моделі розраховували такі параметри: тривимірний об'єм конкременту (V, мм³), середню (Mean Density, HU) та максимальну денситометричну щільність (Max Density, HU) [5].

Ефективність ЕУХЛ оцінювали через 1-3 місяці після втручання за даними ультразвукового дослідження (УЗД) органів сечовидільної системи.

Для статистичного аналізу використовували ROC-аналіз (Receiver Operating Characteristic) із розрахунком площі під кривою (AUC), оптимального порогу відсікання (cut-off value, OC), індексу Юдена (YI), чутливості (Se), специфічності (Sp), а також відношення правдоподібності позитивного (+LR) та негативного (-LR) результатів. Також розраховували 95% довірчий інтервал (95% ДІ). Статистично значущими вважали результати при рівні $p < 0,05$.

Робота виконана з дотриманням принципів Гельсінської декларації, Конвенції Ради Європи про права людини і біомедицину, настанов ICH GCP та відповідних законів України, що схвалено комісією з питань етики наукових досліджень ДНТ «Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького».

На проведення досліджень була отримана інформована згода пацієнтів, батьків дітей (або їхніх опікунів).

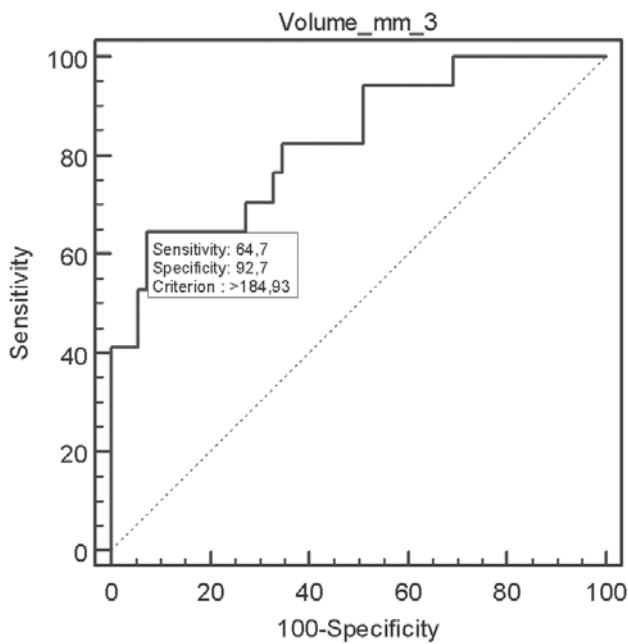


Рис. 1. ROC-крива прогностичної цінності об'єму конкременту щодо ефективності ЕУХЛ

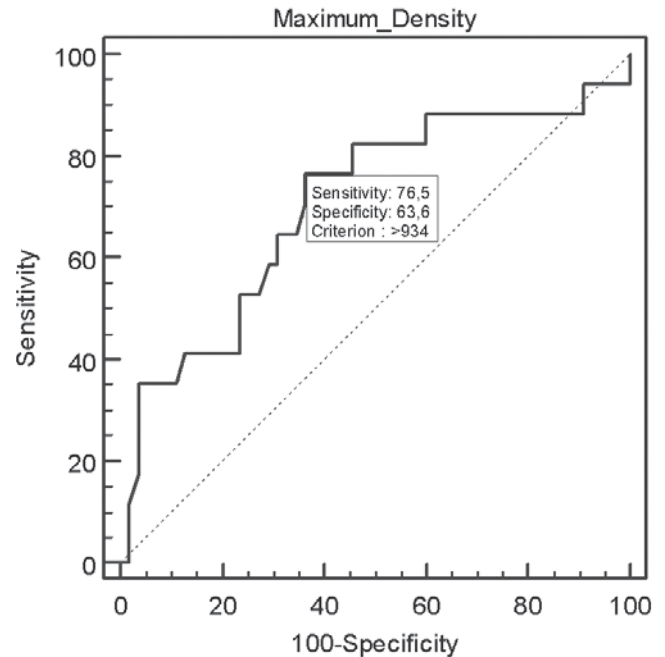


Рис. 2. ROC-крива прогностичної цінності максимальної щільності конкременту щодо ефективності ЕУХЛ

Результати досліджень та їх обговорення

За результатами обстеження, 3D-об'єм конкременту виявився найбільш точним предиктором ефективності ЕУХЛ. Площа під ROC-кривою склала 0,829 (95% ДІ: 0,72–0,91; $p < 0,001$), що свідчить про високу роздільну здатність моделі. Значення максимального індексу Юдена дозволив визначити оптимальне порогове значення об'єму конкременту – 184,9 мм³, що демонструє високу специфічність у прогнозуванні результату – 92,7%. Порогове значення об'єму конкременту 184,9 мм³ асоціюється з різким зростанням ризику невдачі втручання. Позитивне відношення правдоподібності (+LR=8,9) підтверджує високу прогностичну цінність цього параметра (рис. 1, табл. 1).

Максимальна щільність конкременту також продемонструвала статистично значущий вплив на результат успішності втручання – AUC=0,704;

$p=0,011$ при пороговому значенні – 934 HU. Вона має вищу чутливість порівняно з об'ємом конкременту, однак нижчу специфічність (Se=76,5%, Sp=63,6%). Це дозволяє використовувати максимальну щільність конкременту як скринінговий параметр для виявлення «твердих» конкрементів (рис. 2, табл. 1).

Натомість середня щільність конкременту за площею під ROC-кривою не виявила статистичної значущості – AUC=0,655; $p=0,071$. Проте детальний аналіз ROC-кривої показав, що при середній щільності конкременту понад 563,8 HU ризик неефективної фрагментації при ЕУХЛ значно зростає. Специфічність цього прогнозу сягає 96,4%, а позитивне відношення правдоподібності становить 9,7. Хоча цей параметр загалом не є потужним, однак екстремально високі значення виявляються критичними. Поряд із цим, наявність навіть невеликого надщіль-

Таблиця 1

Операційні характеристики прогностичних маркерів ефективності ЕУХЛ

Предиктор	AUC (95% ДІ)	p	Cut-off	Чутливість, %	Специфічність, %	+LR
V, мм ³	0,829 (0,72–0,91)	<0,001	>184,9	64,7	92,7	8,9
HUmax, HU	0,704 (0,58–0,81)	0,011	>934	76,5	63,6	2,1
HUmean, HU	0,655 (0,53–0,76)	0,071	>563,8	35,3	96,4	9,71
Вік, роки	0,554 (0,43–0,67)	0,5	–	–	–	–

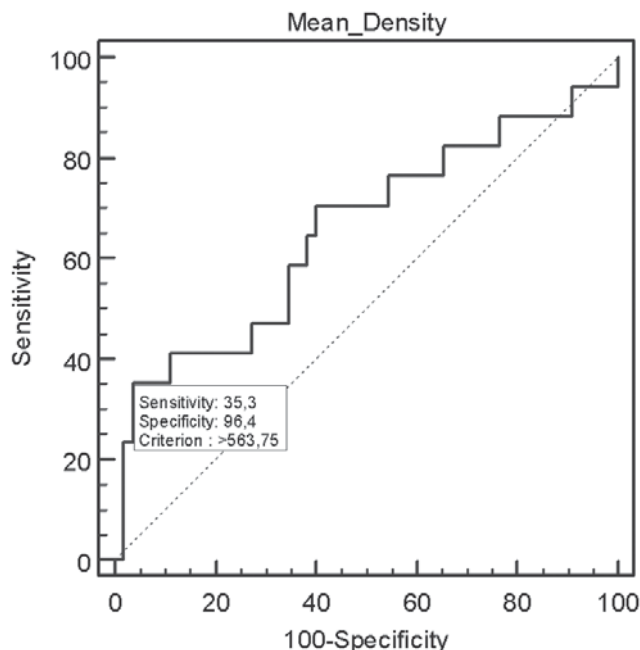


Рис. 3. ROC-крива прогностичної цінності середньої щільності конкременту щодо ефективності ЕУХЛ

ного ядра в конкременті значно перешкоджає його фрагментації (рис. 3, табл. 1).

Проведений ROC-аналіз продемонстрував низьку роздільну здатність віку пацієнтів як прогностичного чинника, оскільки показник AUC не досяг рівня статистичної значущості – $AUC=0,554$; 95% ДІ: 0,43–0,67; $p=0,5$. Вхідження значення 0,5 до меж 95% ДІ підтверджує статистичну незначущість отриманих даних. Це підтверджує нульову гіпотезу про відсутність впливу віку дитини на ефективність фрагментації конкрементів при застосуванні ЕУХЛ (рис. 4, табл. 1).

У багатьох клінічних настановах, включаючи рекомендації EAU (2024), розмір конкременту досі вказується в лінійних одиницях (мм) [15,19]. Однак наш аналіз доводить, що такий підхід може бути недостатньо точним при використанні в дитячій популяції. Отримані результати дослідження підкреслюють необхідність переходу від традиційної двовірної оцінки конкрементів до прецизійної 3D-волюметрії, особливо в педіатричній урології. Традиційна 2D-метрика конкрементів за даними КТ або УЗД апіорі ґрунтується на припущенні про їх правильну сферичну чи еліпсоїдну форму. Проте в дітей конкременти часто мають неправильну конфігурацію. Два конкременти з однаковим діаметром 10 мм можуть відрізнятися за об'ємом до 40–50% – зокрема, якщо один із них є тонким та подовженим, а інший – масивним. Виявлене нами порогове значення $184,9 \text{ мм}^3$, що приблизно відпо-

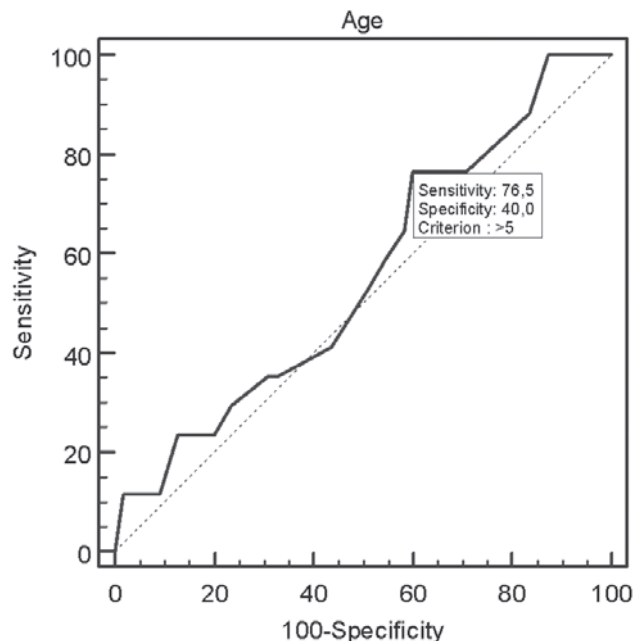


Рис. 4. ROC-крива прогностичної цінності віку пацієнта щодо ефективності ЕУХЛ

відає сфері діаметром 7 мм, виступає як «фізичний ліміт» для стандартного сеансу ЕУХЛ. При перевищенні цього об'єму кількість енергії, яка подається фокусованою ударною хвилею, розподіляється на занадто велику масу. Це зумовлює лише крайову фрагментацію конкременту без повної дезінтеграції його центральних структур [2,7,8,9,13,15,17]. Підтвердженням є висока специфічність нашої моделі – 92,7%. Таким чином, значення об'єму конкременту нижче встановленого порогу є сприятливою прогностичною ознакою успішної монотерапії ЕУХЛ.

Окремої уваги заслуговує роль максимальної щільності конкременту. За даними літератури, дослідники переважно фокусуються на середній щільності конкременту. У дітей конкременти зазвичай мають гетерогенну структуру, і наше дослідження показало, що $HU_{\max}$ є більш вагомим предиктором ефективності ЕУХЛ у дітей ($Se=76,5\%$). Тотожні дані наводять інші дослідники. Вони вказують на пряму кореляцію між щільністю конкременту та кількістю імпульсів, які необхідні для його руйнування [3,4].

На відміну від дорослих, у дітей конкременти переважно менш тверді, але зазвичай мають щільне ядро – понад 934 HU. Таке ядро формує акустичний бар'єр, який зумовлює відбиття ударної хвилі та мінімізує її дисипацію у глибинні структури конкременту. Навіть якщо середня щільність конкременту загалом є низькою (наприклад, за рахунок

пористої структури периферії), то саме щільне ядро стає причиною формування великих резидуальних фрагментів. Це пояснює ті клінічні випадки, коли конкременти з низькою середньою щільністю ефективно не фрагментуються [3,8].

Використання безкоштовного програмного забезпечення для нативної КТ, а саме 3D Slicer, робить це обстеження доступним для будь-якого урологічного стаціонару без додаткових витрат на дороговартісне обладнання. Сегментація конкременту займає в середньому 3–5 хвилин, що є цілком прийнятним для передопераційного планування. Точність КТ-діагностики при СКХ прямо залежить від високої якості візуалізації та інтерпретації результатів досвідченим субспеціалізованим урорадіологом. При СКХ досвідчений урорадіолог оцінює не лише наявність конкременту, а й його внутрішню архітектуру, щільність, точне розташування щодо анатомічних звужень та стан навколишніх тканин [14].

Проте слід враховувати застереження технічного характеру. Так, якщо сегментацію конкрементів проводити на основі КТ-зрізів товщиною 0,5–1,0 мм, то при надто малих розмірах конкрементів (до 4 мм) виникає ефект «часткового об'єму» («partial volume effect»), який може призводити до похибки у вимірюванні об'єму та щільності. Однак таким пацієнтам зазвичай призначають консервативне лікування з високою імовірністю самостійного відходження конкременту без додаткових хірургічних втручань.

У дослідженні не враховували відстань від шкіри до конкременту (skin-to-stone distance, SSD), яка в дорослих є важливим предиктором. У дітей її роль вважається менш вагомою через несуттєву товщину підшкірно-жирової клітковини. Також у дослідженні не проводили аналіз складу сечі та метаболічного профілю пацієнтів. Ці дані можуть дати додаткові пояснення щодо резистентності деяких каменів до ударно-хвильової дії. Майбутні проспективні дослідження доцільно зосередити на поєднанні 3D-волюметрії з метаболічним профілем пацієнта.

Відсутність статистично значущої залежності з віком пацієнта ($p=0,5$) є важливим клінічним показником універсальності ЕУХЛ. Отримані результати верифікують факт, що фізика ударної хвилі та опірність конкрементів є константними чинниками, які не залежать від віку пацієнта в межах педіатричної популяції. Це підтверджує широку релевантність визначених порогових значень ($V=184,9 \text{ мм}^3$ та $HU_{\max}=934 \text{ HU}$), що дозволяє однаково ефективно застосовувати їх як для немовлят, так і для підлітків.

Такий універсалізм спрощує впровадження автоматизованих систем підтримки прийняття клінічних рішень [16].

Пропонуємо клінічне застосування отриманих результатів дослідження, а саме тактику лікування СКХ у дітей, розподіляючи пацієнтів за двома зонами ризику.

Зона низького ризику. При об'ємі конкременту менше $184,9 \text{ мм}^3$ методом вибору є ЕУХЛ з очікуваною ефективністю понад 90%.

Зона помірного ризику. При параметрах конкременту, які не суттєво перевищують об'єм $184,9 \text{ мм}^3$ або максимальну щільність 934 HU, під час сеансу ЕУХЛ доцільно використовувати більшу кількість імпульсів або меншу частоту ударів. Це покращить фрагментацію твердих конкрементів. Також необхідно проінформувати батьків щодо імовірності повторного сеансу ЕУХЛ або використання альтернативних методик.

Висновки

3D-об'єм конкременту визначено як найвагоміший незалежний предиктор ефективності ЕУХЛ у педіатричній практиці. Використання порогового критерію $184,9 \text{ мм}^3$ демонструє специфічність на рівні 92,7% у передбаченні позитивного результату терапії.

Максимальна щільність конкременту понад 934 HU виступає критичним чинником ризику, що корелює з удвічі вищою імовірністю збереження резидуальних фрагментів ($+LR=2,1$) та зниженням ефективності односеансної ЕУХЛ.

Застосування 3D-волюметрії у повсякденній клінічній практиці трансформує підхід до вибору терапії СКХ у дітей з емпіричного в об'єктивно верифікований. Це сприяє запобіганню недоцільним операціям та оптимізації анестезіологічного супроводу педіатричних пацієнтів.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

References/Література

1. Ackermann D, Claus R, Zehntner C, Riedel C. (1988). Influence of stone density and size on the success of extracorporeal shock wave lithotripsy. *Urol Res.* 16(5): 371-375.
2. Assimos D, Krambeck A, Miller NL et al. (2016). Surgical management of stones: American Urological Association/Endourological Society Guideline, PART I. *J Urol.* 196(4): 1153-1160.
3. Bosio A, Alessandria E, Agosti S et al. (2021). Stone density and stone volume: can they predict the success of shock wave lithotripsy? *Urol Int.* 105(5-6): 424-430.
4. El-Assmy A, El-Nahas AR, Abou-El-Ghar ME et al. (2020). Predictors of success of extracorporeal shock wave lithotripsy for renal stones: have we reached a definitive conclusion? *Arab J Urol.* 18(1): 30-36.

Original articles. Urology and gynecology

5. Fedorov A, Beichel R, Kalpathy-Cramer J et al. (2012). 3D Slicer as an image computing platform for the Quantitative Imaging Network. *Magn Reson Imaging*. 30(9): 1323-1341.
6. Geraghty RM, Jones P, Somani BK. (2020). Worldwide trends of urinary stone disease treatment over the last two decades: a systematic review. *Eur Urol Focus*. 6(3): 547-556.
7. Ichiyanagi O, Fukuhara H, Kurokawa M et al. (2022). Stone volume is a potent predictor of stone-free status after retrograde intrarenal surgery for stones >20 mm. *Urol J*. 19(1): 14-20.
8. Jain S, Jain S, Shahi M. (2022). Stone volume as a predictor of success in extracorporeal shock wave lithotripsy for renal stones. *Cureus*. 14(10): e30485.
9. Joseph P, Mandal AK, Singh SK, Mandal AK, Sharma SK, (2002). Goswami AK. Computed tomography attenuation value predicts the outcome of shock wave lithotripsy for renal stones. *J Urol*. 167(5): 1968-1971.
10. Lingeman JE, Matlaga BR, Evan A. (2009). Shock wave lithotripsy: advances in technology and technique. *Nat Rev Urol*. 6(5): 260-269.
11. Manzoor S, Hashmi AH, Sohail MA, Khurram M, Bhatti S. (2014). Success factors of extracorporeal shock wave lithotripsy (ESWL) for renal & ureteric calculi. *Open J Urol*. 4(4): 32-37.
12. Moore CL, Carpenter CR, Heilbrun ME et al. (2023). Imaging in suspected renal colic: efficiency and radiation exposure relative to an integrated ED-radiology care path. *AJR Am J Roentgenol*. 220(1): 55-64.
13. Nakonechnyi RA, Nakonechnyi AY. (2026). Treatment strategy for urolithiasis in children based on stone volume. *Modern Pediatrics. Ukraine*. 3(155): 82-86. doi: 10.15574/SP.2026.3(155).8286.
14. Nakonechnyi YA, Mytsyk YuO, Nakonechnyi AY, Borzhievskiy ATs. (2025). Personalized preservation extraperitoneoscopic radical prostatectomy in high-risk prostate cancer patients. *Paediatric Surgery (Ukraine)*. 3(88): 87-94. doi: 10.15574/PS.2025.3(88).8794.
15. Rehfuß AJ, Salkini MW. (2020). Stone volume is a better predictor of SWL success than maximum diameter. *J Endourol*. 34(5): 602-603.
16. Soliman MG, Kenawy MS, El-Sawy AS et al. (2021). Extracorporeal shock wave lithotripsy in children: a 25-year experience at a single center. *J Pediatr Urol*. 17(3): 360.e1-360.e7.
17. Sorokin I, Mammen T, Alamir S et al. (2023). Predictors of shock wave lithotripsy success: a comprehensive review. *Curr Urol Rep*. 24(2): 45-53.
18. Tasian GE, Ross ME, Song L et al. (2016). Annual incidence of nephrolithiasis among children and adults in South Carolina from 1997 to 2012. *Clin J Am Soc Nephrol*. 11(3): 488-496.
19. Türk C, Neisius A, Petřík A et al. (2024). EAU Guidelines on Urolithiasis. Arnhem (The Netherlands): EAU Guidelines Office.

Відомості про авторів:

Наконечний Ростислав Андрійович – к.мед.н., доц. каф. хірургії та серцево-судинної хірургії трансплантології ФПДО ДНТ «ЛНМУ ім. Д. Галицького». Адреса: м. Львів, вул. П. Орлика, 4. <https://orcid.org/0000-0003-0645-3361>.

Наконечний Андрій Йосифович – д.мед.н., проф., зав. каф. дитячої хірургії ДНТ «ЛНМУ ім. Д. Галицького». Адреса: м. Львів, вул. П. Орлика, 4. <https://orcid.org/0000-0003-1402-6642>.

Стаття надійшла до редакції 03.05.2026 р., прийнята до друку 15.06.2026 р.