

УДК 616.8-089

DOI <https://doi.org/10.32689/2663-0672-2025-3-7>

Ігор КРИЦЬКИЙ

кандидат медичних наук, доцент кафедри дитячих хвороб з дитячою хірургією, Тернопільський національний медичний університет імені І.Я. Горбачевського МОЗ України, krycky@tdmu.edu.ua
ORCID: 0000-0003-0469-2684

Анастасія ДЯЧИШИН

здобувач вищої освіти, Тернопільський національний медичний університет імені І.Я. Горбачевського МОЗ України, dyachyshyn_anayur@tdmu.edu.ua
ORCID: 0009-0003-7266-0374

Павло ГОЩИНСЬКИЙ

кандидат медичних наук, доцент кафедри дитячих хвороб з дитячою хірургією, Тернопільський національний медичний університет імені І.Я. Горбачевського МОЗ України, hoschynsky@tdmu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-5849-0335

Володимир ДЖИВАК

доктор філософії за спеціальністю Медицина, асистент кафедри дитячих хвороб з дитячою хірургією, Тернопільський національний медичний університет імені І.Я. Горбачевського МОЗ України, djyvak@tdmu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-4885-7586

Оксана ХЛІБОВСЬКА

кандидат медичних наук, доцент кафедри акушерства та гінекології факультету післядипломної освіти, Тернопільський національний медичний університет імені І.Я. Горбачевського МОЗ України, chlibovska@tdmu.edu.ua
ORCID: 0000-0003-3293-0010

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ФЛУОРЕСЦЕНТНОЇ ДІАГНОСТИКИ Й НАВІГАЦІЇ У ДИТЯЧІЙ ХІРУРГІЇ

У дитячій урології точність хірургічних дій має вирішальне значення, адже навіть мінімальна похибка може вплинути на функціонування організму та якість життя дитини. Сучасні технології відкривають нові можливості для безпечнішого та ефективнішого лікування. Флуоресцентна візуалізація з використанням індоціанінового зеленого (ICG) дозволяє в реальному часі оцінювати кровопостачання тканин, визначати межі резекції та виявляти судинні структури. Це підвищує точність і безпеку втручань. Застосування ICG-NIRF у дитячій хірургії є важливим кроком у сфері технологічних інновацій.

Мета дослідження: аналіз сучасних клінічних даних щодо застосування флуоресцентної візуалізації з індоціаніновим зеленим (ICG) у дитячій урології, визначення її діагностичного та хірургічного потенціалу, а також оцінка ефективності методу в підвищенні точності та безпеки оперативних втручань.

Матеріали та методи: проведено огляд сучасної наукової літератури за базами даних PubMed, Scopus, Web of Science та Google Scholar із використанням ключових слів: "indocyanine green", "fluorescence imaging", "pediatric urology", "ICG-NIRF", "robotic surgery". До дослідження увійшли клінічні спостереження, проспективні та ретроспективні серії випадків, які висвітлюють застосування ICG-NIRF у різних хірургічних операціях дитячої урології, зокрема роботизованих втручаннях. Аналіз проводився з урахуванням показників ефективності, безпеки та технічних особливостей виконання операцій.

Результати обстеження та їх обговорення: аналіз літературних джерел показав, що використання ICG-NIRF значно покращує візуалізацію судинних та лімфатичних структур, дозволяючи хірургу точно оцінювати перфузію тканин у реальному часі. Такий підхід знижує ризик ішемічних ускладнень, полегшує виконання органозберігаючих операцій і загалом сприяє зменшенню випадків післяопераційних ускладнень. Застосування флуоресцентної навігації надзвичайно корисне в педіатричній практиці, де анатомічні особливості дітей потребують максимальної точності. Незважаючи на певні технічні обмеження (глибина проникнення сигналу, коротка тривалість флуоресценції), переваги методу значно переважають, забезпечуючи новий рівень контрольованості та безпеки хірургічних втручань.

Висновки: флуоресцентна візуалізація з індоціаніновим зеленим є інноваційним інструментом, що розширює можливості дитячої урології. Вона підвищує точність, мінімізує ризики ускладнень і сприяє розвитку мінімально інвазивної хірургії. Подальше вдосконалення технології та стандартизація протоколів її застосування відкривають перспективи для ще більш безпечного й ефективного лікування дітей з різними патологіями.

© І. Крицький, А. Дячишин, П. Гощинський, В. Дживак, О. Хлібовська, 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Ключові слова: флуоресцентна візуалізація, індоціаніновий зелений, ICG-NIRF, дитяча урологія, мінімально інвазивна хірургія, роботизована хірургія, судинна навігація.

Ihor Krytsky, Anastasiia Dyachyshyn, Pavlo Hoshchynskyi, Volodymyr Dzhyvak, Oksana Khlibovska.
MODERN APPROACHES TO FLUORESCENT DIAGNOSTICS AND NAVIGATION IN PAEDIATRIC SURGERY

In paediatric urology, surgical precision is crucial, as even the slightest error can affect the functioning of the body and the quality of life of the child. Modern technologies open up new opportunities for safer and more effective treatment. Fluorescent imaging using indocyanine green (ICG) allows real-time assessment of tissue blood supply, determination of resection margins, and detection of vascular structures. This increases the accuracy and safety of interventions. The use of ICG-NIRF in paediatric surgery is an important step in the field of technological innovation.

Research objective: to analyse current clinical data on the use of indocyanine green (ICG) fluorescence imaging in paediatric urology, determine its diagnostic and surgical potential, and evaluate the effectiveness of the method in improving the accuracy and safety of surgical interventions.

Materials and methods: A review of current scientific literature was conducted using the PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar databases with the following keywords: 'indocyanine green,' 'fluorescence imaging,' 'paediatric urology,' 'ICG-NIRF,' and 'robotic surgery.' The study included clinical observations, prospective and retrospective case series highlighting the use of ICG-NIRF in various surgical procedures in paediatric urology, including robotic interventions. The analysis was conducted taking into account the effectiveness, safety and technical features of the operations.

Survey results and discussion: Analysis of the literature showed that the use of ICG-NIRF significantly improves the visualisation of vascular and lymphatic structures, allowing the surgeon to accurately assess tissue perfusion in real time. This approach reduces the risk of ischaemic complications, facilitates organ-preserving surgery, and generally contributes to a reduction in postoperative complications. The use of fluorescent navigation is extremely useful in paediatric practice, where the anatomical features of children require maximum precision. Despite certain technical limitations (signal penetration depth, short fluorescence duration), the advantages of the method significantly outweigh the disadvantages, providing a new level of control and safety in surgical interventions.

Conclusions: Fluorescent imaging with indocyanine green is an innovative tool that expands the possibilities of paediatric urology. It increases accuracy, minimises the risk of complications and promotes the development of minimally invasive surgery. Further improvement of the technology and standardization of its application protocols open up prospects for even safer and more effective treatment of children with various pathologies.

Key words: fluorescent imaging, indocyanine green, ICG-NIRF, paediatric urology, minimally invasive surgery, robotic surgery, vascular navigation.

Вступ. Дитяча урологія належить до сфер, де точність хірургічного втручання має вирішальне значення. Малий розмір анатомічних структур, їх індивідуальна варіабельність і потреба збереження функціональної тканини створюють серйозні виклики для хірурга. Традиційні методи візуалізації не завжди забезпечують достатній рівень деталізації, що може підвищувати ризик ускладнень та повторних втручань. Використання технологій візуалізації для підвищення хірургічної точності здійснило революцію в сучасній медицині. Серед цих методів флуоресцентна хірургія (ФХХ) здобула популярність, особливо завдяки своїм можливостям візуалізації в режимі реального часу під час хірургічних процедур. Індоціаніновий зелений (ІЗЗ), флуоресцентний барвник ближнього інфрачервоного діапазону, є одним з найбільш широко використовуваних агентів у ФХХ [8, 9].

Флуоресцентна візуалізація з використанням індоціаніну зеленого (ICG) у ближньому інфрачервоному спектрі стала одним із найперспективніших напрямів сучасної хірургії. Технологія дозволяє в реальному часі оцінювати кровопостачання тканин, визначати межі резекції та виявляти судинні й лімфатичні структури, тим самим підвищуючи безпеку і точність операцій [1].

Попри значний досвід використання ICG у загальній і судинній хірургії, його застосування в дитячій урології поки залишається обмеженим

і переважно представлено окремими серіями клінічних випадків або пілотними дослідженнями. Незважаючи на його безпеку та більш широке використання в дитячій хірургії, всі опубліковані дослідження в дитячій урології на сьогодні обмежуються досвідом невеликих центрів та одного центру, що відображає новий характер цієї технології в цій галузі [10]. Водночас результати наявних робіт свідчать про перспективність методу та його потенційну роль у стандартизації хірургічних підходів.

Метою цієї статті є аналіз сучасних клінічних даних щодо застосування флуоресцентної візуалізації з індоціаніновим зеленим (ICG) у дитячій урології, оцінка її ролі у підвищенні точності, безпеки та ефективності хірургічних втручань, а також узагальнення досвіду використання методу на основі актуальної наукової літератури.

Матеріали та методи. Літературний пошук було проведено з використанням міжнародних наукових баз даних Scopus, Web of Science, PubMed та Google Scholar. У межах роботи здійснено систематичний огляд сучасних досліджень, присвячених застосуванню флуоресцентної візуалізації з індоціаніновим зеленим (ICG) у дитячій урології.

Проаналізовано наукові праці, що висвітлюють клінічні аспекти використання технології ICG-NIRF під час пієлопластики, нефректомії, варикоцелектомії, реконструкцій при гіпоспадії та ін.

Літературний пошук здійснювався за допомогою ключових слів: «*indocyanine green*», «*fluorescence imaging*», «*ICG-NIRF*», «*pediatric urology*», «*robotic surgery*», «*tissue perfusion*», «*minimally invasive surgery*». Відібрані джерела були проаналізовані з метою оцінки ефективності методу, його безпечності, клінічних результатів і перспектив подальшого розвитку технології.

Результати обстеження та їх обговорення.

Індоціаніновий зелений (ICG) – це водорозчинний флуоресцентний барвник ближнього інфрачервоного спектра, який після внутрішньовенного введення швидко зв'язується з альбуміном плазми і циркулює у судинному руслі. При опроміненні світлом довжиною близько 807 нм він випромінює флуоресценцію в діапазоні 822 нм, що добре візуалізується спеціальними камерами та системами, інтегрованими в роботизовані комплекси, як-от da Vinci Xi з модулем Firefly® [1]. Завдяки короткому періоду напіввиведення (2–4 хв) ICG можна вводити повторно під час однієї операції. Барвник виводиться гепатобіліарним шляхом, що додатково дозволяє оцінювати стан жовчних проток. Безпечність препарату підтверджена численними дослідженнями: серйозні реакції трапляються вкрай рідко, здебільшого у пацієнтів з йодною чутливістю [3].

Esposito et al. (2024) дослідили ефективність ICG-NIRF під час 55 роботизованих втручань у дітей віком від 1 до 17 років [1]. До переліку процедур входили пієлопластика, реімплантація сечоводу, варикоцелектомія, нефректомія, часткова нефректомія та видалення кіст нирки. ICG вводили у дозі 0,2–0,3 мг/кг внутрішньовенно або локально. Візуалізація наставала через 30–120 с і тривала до 7 хв, забезпечуючи надійну орієнтацію в анатомії. Усі операції завершили без переходу на відкритий доступ, ускладнень не зафіксовано. Застосування індоціанінового зеленого (ICG) під час варикоцелектомії дозволило значно покращити ідентифікацію лімфатичних судин, що є критичним для запобігання утворенню гідроцеле – одного з найпоширеніших ускладнень лапароскопічного втручання. Внутрішньояєчкове введення 1 мл ICG (2,5 мг/мл) забезпечує візуалізацію лімфатичних шляхів протягом 60 с, що допомагає зберегти важливі структури й виконати щадну дисекцію [1].

Флуоресцентна візуалізація ICG стала цінним методом лікування варикоцеле у дітей, зокрема, при лімфозберігаючій лапароскопічній варикоцелектомії Паломо. Zundel S, Szavay P. (2024) повідомили про багатообіцяючі результати використання паратестикулярної ін'єкції ICG (6,25 мг) для успішної візуалізації лімфатичних судин без пошкодження яєчок. Візуалізація лімфатичних судин у більшості випадків відбувалася швидко, і жодних

побічних ефектів, таких як пошкодження яєчок або забарвлення мошонки, не спостерігалось [11].

Крім того, Tomita K et al. у своїй статті досліджували використання флуоресцентної ангіографії ICG при лапаро-ендоскопічній варикоцелектомії в одному місці шляхом внутрішньовенного введення. Використовуючи цю методику, автори показали роль ICG у виявленні сім'яних артерій та вен, забезпечуючи точне лігування вен, зберігаючи при цьому артерії та лімфатичні судини, тим самим зменшуючи такі ускладнення, як гідроцеле та рецидиви [12].

Наукова робота Esposito et al. (2021) розглядає технологію ICG-NIRF особливо корисною для визначення судинної анатомії нирки, оцінки перфузії та меж патологічного процесу [2]. Барвник допомагав відрізнити життєздатну тканину від ішемізованої, що важливо при органозберігаючих втручаннях, таких як часткова нефректомія.

У дослідженні Esposito et al. (2019) під час роботизованої реімплантації сечоводу після створення пневмоперитонеуму встановлювали три 8-мм роботизовані порти та один 5-мм асистентський порт, що забезпечувало оптимальний доступ до малого таза. Флуоресцентну навігацію з індоціаніновим зеленим (ICG-NIRF) застосовували у складних випадках міхурово-сечовідного рефлюксу з парауретральним дивертикулом. Для визначення точки входу дивертикула виконували першу ін'єкцію 5–10 мл розчину ICG (2,5 мг/мл) через сечовідний катетер, а для оцінки життєздатності сечоводу – другу внутрішньовенну ін'єкцію ICG (0,3 мг/кг). Використання ICG-NIRF підвищило точність реконструктивного етапу, сприяло безпечнішому препаруванню тканин і допомогло уникнути ішемічних ускладнень [3].

Робота Wang Y et al. (2024) описує, що під час реконструктивних втручань за методом Lich-Gregoir використання ICG дозволяє точно визначати місце входу дивертикула в сечовий міхур і оцінювати життєздатність сечоводу після реімплантації [4]. Це значно підвищує безпечність операції та зменшує ризик ішемічних ускладнень.

Esposito et al. (2020) також досліджували застосування флуоресцентної навігації з індоціаніновим зеленим (ICG) під час лапароскопічних часткових ($n = 7$) та повних нефректомій ($n = 3$) у дітей. До дослідження увійшли 4 дівчинки та 6 хлопчиків, середній вік пацієнтів становив 5,7 року (1–17 років). Показаннями до нефректомії були нефункціонуюча гідронефротична нирка ($n = 2$) та рефлюкс-нефропатія ($n = 1$), а до часткової нефректомії – обструкція верхнього полюса ($n = 4$) та ураження нижнього полюса, пов'язане з міхурово-сечовідним рефлюксом ($n = 3$). Середня тривалість операції становила $78,5 \pm 8$ хвилин, ускладнень не

зафіксовано. Використання ICG-NIRF забезпечило точну візуалізацію судинної анатомії та підвищило безпечність органозберігаючих втручань [5].

Перекут яєчка залишається однією з найчастіших ургентних ситуацій у дитячій урології, де своєчасне рішення щодо збереження або видалення органу є критичним. Komatsu T, et al. (2024) дослідили, що технологія ICG-NIRF дає змогу швидко та об'єктивно оцінити перфузію яєчка після деторсії [6]. Внутрішньовенне введення індоціанінового зеленого забезпечує візуалізацію кровотоку в реальному часі, що допомагає відрізнити життєздатну тканину від ішемізованої. Це підвищує точність хірургічного рішення та зменшує ризик невірної правданої орхіектомії.

Стаття Raines AM, et al. (2024) описує використання ICG-флуоресценції у реконструктивній хірургії гіposпадії для оцінки кровопостачання препуціального клаптя на всіх етапах операції – від його мобілізації до остаточного формування уретри. Такий підхід дозволив хірургу оцінити життєздатність тканин у реальному часі, скоригувати розташування клаптя за потреби та уникнути ішемічних ускладнень, що знижує ризик рубцювання або стриктур у післяопераційному періоді [7].

Індоціаніновий зелений (ICG) має значні переваги, зокрема високу точність візуалізації, низький рівень побічних ефектів і здатність до швидкого

виведення з організму, що дозволяє кілька разів використовувати його під час однієї операції [13]. Це робить ICG незамінним для мінімально інвазивної хірургії, зокрема в дитячій урології. Однак існують і обмеження: для його використання необхідне спеціалізоване обладнання, що може обмежувати доступність технології в деяких закладах. Крім того, короткий період візуалізації може бути недостатнім для тривалих чи складних операцій, а пацієнтам з алергією на йод слід дотримуватися обережності.

Висновки. Флуоресцентна візуалізація з індоціаніновим зеленим (ICG-NIRF) є сучасним інноваційним інструментом, що суттєво розширює можливості дитячої урології.

Ця технологія дозволяє хірургам більш точно оцінювати анатомічні структури та перфузію тканин у реальному часі, зменшуючи ризик інтраопераційних ускладнень і підвищуючи безпечність оперативних втручань. Її впровадження сприяє подальшому розвитку мінімально інвазивної хірургії, забезпечуючи кращі функціональні та естетичні результати.

Подальше вдосконалення технічних аспектів системи, стандартизація протоколів застосування та розширення доказової бази створюють перспективи для ще ефективнішого та безпечнішого лікування дітей із урологічними патологіями.

Література:

1. Di Mitri M., Di Carmine A., Zen B., Collautti E., Bisanti C., D'Antonio S., Libri M., Gargano T., Lima M. Advancing Pediatric Surgery with Indocyanine Green (ICG) Fluorescence Imaging: A Comprehensive Review. *Children*. 2025. Vol. 12, No 4. P. 515. doi: 10.3390/children12040515.
2. Esposito C., Autorino G., Coppola V., Esposito G., Paternoster M., Castagnetti M., et al. Technical standardization of ICG near-infrared fluorescence (NIRF) laparoscopic partial nephrectomy for duplex kidney in pediatric patients. *World J Urol*. 2021. Vol. 39, No 11. P. 4167–4173. doi: 10.1007/s00345-021-03729-1.
3. Esposito C., Del Conte F., Cerulo M., Gargiulo F., Izzo S., Esposito G., Spagnuolo M.I., Escolino M. Clinical application and technical standardization of indocyanine green (ICG) fluorescence imaging in pediatric minimally invasive surgery. *Pediatr Surg Int*. 2019. Vol. 35, No 10. P. 1043–1050. doi: 10.1007/s00383-019-04527-4.
4. Esposito C., Masieri L., Castagnetti M., Escolino M., Farina A., Di Meo S. Indocyanine green (ICG) fluorescence technology in pediatric robotic surgery. *J Robot Surg*. 2024. Vol. 18, No 3. P. 1023–1032. doi: 10.1007/s11701-024-01968-w.
5. Esposito C., Settimi A., Del Conte F., et al. Image-guided pediatric surgery using indocyanine green (ICG) fluorescence in laparoscopic and robotic surgery. *Front Pediatr*. 2020. Vol. 8. P. 314. doi: 10.3389/fped.2020.00314.
6. Komatsu T., et al. Indocyanine green fluorescence imaging as a predictor of long-term testicular atrophy in testicular torsion: a pilot study. *Surg Today*. 2024. Vol. 54, No 6. P. 719–727. doi: 10.1007/s00595-024-02908-9.
7. Lee A.S.T., Tong C.M.C. Novel Intraoperative Applications of Fluorescence Imaging Using Indocyanine Green in Pediatric Urology. *Curr Urol Rep*. 2025. Vol. 26. P. 26. doi: 10.1007/s11934-025-01256-6.
8. Morales-Conde S., Licardi E., Alarcon I., Balla A.K. Guía de fluorescencia de verde de indocianina (ICG) para su uso y indicaciones en cirugía general: recomendaciones basadas en revisión descriptiva de la literatura y análisis de la experiencia. *Cir Esp*. 2022. Vol. 100. P. 534–54. doi: 10.1016/j.ciresp.2022.01.004.
9. Paraboschi I., De Coppi P., Stoyanov D., Anderson J., Giuliani S. Fluorescent visualization in pediatric surgery: state-of-the-art and future perspectives. *J Pediatr Surg*. 2021. Vol. 56, No 4. P. 655–662.
10. Raines A.M., et al. Preputial pedicle flap ICG blood flow assessment during proximal hypospadias repair: development of a standardized protocol. *J Pediatr Urol*. 2024. Vol. 20, No 4. P. 537.e1–537.e7.
11. Tomita K., Kageyama S., Hanada E., Yoshida T., Okinaka Y., Kubota S., Nagasawa M., Johnin K., Narita M., Kawauchi A. Indocyanine green angiography-assisted laparoendoscopic single-site varicocelectomy. *Urology*. 2017. Vol. 106. P. 221–225. doi: 10.1016/j.urology.2017.04.027.
12. Wang Y., Zhang H. Safety and pharmacokinetics of indocyanine green in pediatric surgery. *Front Pediatr*. 2024. Vol. 12. P. 314. doi: 10.3389/fped.2024.00314.

13. Zundel S., Szavay P. Para-testicular injection of indocyanine green for laparoscopic immunofluorescence-guided lymphatic-sparing Palomo procedure: Promising preliminary results. *J Pediatr Urol.* 2024. Vol. 20, No 3. P. 530–532. doi: 10.1016/j.jpuro.2024.02.023.

Дата надходження статті: 20.10.2025

Дата прийняття статті: 25.11.2025

Опубліковано: 29.12.2025