

УДК 3709

DOI <https://doi.org/10.32782/eddiscourses/2026-3-6>

БІОФІЗИЧНІ АСПЕКТИ ДІАГНОСТИКИ ОНКОЛОГІЧНИХ ЗАХВОРЮВАНЬ ПЕРЕДМІХУРОВОЇ ЗАЛОЗИ

Гриценко Наталія Леонідівна,

кандидат педагогічних наук, доцент кафедри медичної і біологічної фізики та інформатики,
Національний медичний університет імені О.О. Богомольця
ORCID: 0000-0001-7686-4540

Петрук Максим Олександрович,

здобувач вищої освіти,
Навчально-науковий інститут медицини
Національного медичного університету імені О.О. Богомольця
ORCID: 0009-0003-1474-5329

Робота присвячена комплексному аналізу біофізичних та біомеханічних аспектів діагностики онкологічних захворювань передміхурової залози та можливостей їх використання у процесі підготовки магістрів медицини. Актуальність дослідження посилюється високим рівнем поширеності та летальності цього захворювання серед населення, що потребує підвищення точності у його діагностиці на ранніх стадіях, а також мінімізації лікарських помилок під час проведення медичних маніпуляцій. В статті описано та проаналізовано анатомо-гістологічну структуру органа, де спостерігається розвиток доброякісної гіперплазії або злоякісне переродження біологічних тканин. Виявлено, що розвиток аденокарциноми пов'язаний із віковими змінами й призводить до змін у структурі органа і, відповідно, його механічних властивостях, а саме підвищенні жорсткості тканинного матриксу та зростанні модуля пружності Юнга. Розглянуто основні принципи релаксації механічної напруги та застосування гіперпружних моделей для компенсації деформації під час інвазивних процедур. Особливу увагу сфокусовано на аналізі і порівнянні показників модуля пружності здорової тканини залози та уражених пухлиною тканин та кількісної оцінки цих змін за допомогою методу еластографії, як технології візуалізації зсувних хвиль і локальних деформацій. В статті проаналізовано один з високоточних методів сучасної діагностики в онкоурології, а саме fusion-біопсія, що полягає у злитті двох методів візуалізації у реальному часі: мультипараметричної томографії та ультразвукової діагностики. Досліджено біофізичні принципи методу просторового електромагнітного трекінгу (відстеження) положення біопсійної голки відносно УЗД датчика у 3D просторі. Проаналізовано сучасні наукові публікації з кількісними результатами ефективності виявлення пухлин за допомогою технології fusion-біопсії та традиційної трансректальної ультразвукової біопсії.

Ключові слова: медична освіта, біофізика, fusion-біопсія, мультипараметрична магнітно-резонансна томографія, еластографія, модуль Юнга, жорсткість, еластичність, 3D-візуалізація.

Hrytsenko Natalia, Petruk Maksym. Biophysical aspects of the diagnosis of prostate cancer

The work is devoted to a comprehensive study and theoretical substantiation of biophysical and biomechanical aspects of the prostate cancer diagnostic. The relevance of the study is enhanced by the high prevalence and lethality of this disease among the population, which requires increasing the accuracy of its diagnosis in the early stages, as well as minimizing medical errors during medical manipulations. The article examines and analyzes the anatomical and histological structure of the organ, where the development of benign hyperplasia or malignant degeneration of biological tissues is observed. It was found that the development of adenocarcinoma is associated with age-related changes and leads to changes in the structure of the organ and, accordingly, its mechanical properties, namely, an increase in the rigidity of the tissue matrix and an increase in the Young's modulus. The basic principles of stress relaxation and the use of hyperelastic models to compensate for deformation during invasive procedures are considered. Particular attention is focused on the analysis and comparison of the elastic modulus of healthy gland tissue and tumor-affected tissues and the quantitative assessment of these changes using the elastography method, as a technology for visualizing of shear waves and local deformations. The article analyzes one of the most accurate methods of modern diagnostics in oncology, namely fusion biopsy, which consists in merging two real-time visualization methods: multiparametric tomography and ultrasound diagnostics. The biophysical principles of the method of spatial electromagnetic tracking (tracking) of the position of the biopsy needle relative to the ultrasound sensor in 3D space are studied. Modern scientific publications with quantitative results of the effectiveness of tumor detection using fusion biopsy technology and traditional transrectal ultrasound biopsy are analyzed.

Key words: Medical education, biophysics, fusion biopsy, multiparametric magnetic resonance imaging, elastography, Young's modulus, stiffness, elasticity, 3D visualization.



Вступ. Однією з провідних тенденцій розвитку медичної освіти є її практична орієнтованість. Онкологія передміхурової залози (Prostate Cancer, надалі PC) залишається одним із найпоширеніших захворювань у світі, зокрема в Україні (13,2% серед усіх випадків онкологічних захворювань) на 2022 рік їх кількість становила 7544 випадків, з яких 2501 – летальні [1]. Тому PC потребує глибшого вивчення біомеханічних маркерів та інтеграції сучасних методів візуалізації та навігації для підвищення точності виявлення. До 2018 року найпоширенішим методом діагностики захворювання було забирання біоптату за допомогою традиційної трансректальної біопсії під ультразвуковим контролем (TRUS-Bx), що мав ряд недоліків. Наприклад, під час виконання процедури залишалася ймовірність того, що пухлинне вогнище може залишитися між проколами або ж прокол може пройти поряд, не виявивши в біоптаті пухлинних клітин або неточної оцінки рівня небезпечності [2]. Для вирішення цих недоліків у сучасну медичну діагностику захворювань передміхурової залози було впроваджено використання мультипараметричної магнітно-резонансної томографії, яка в подальшому стала основою для високоточного методу fusion-біопсії.

Мета та задачі дослідження. У роботі поставлено за мету дослідити, проаналізувати, узагальнити біофізичні та біомеханічні аспекти підвищення точності діагностики онкологічних захворювань передміхурової залози, зокрема із застосуванням технологій fusion-біопсії.

Завданнями дослідження було охарактеризувати біофізичні властивості тканин передміхурової залози, особливості її патогенезу, методи еластографії, технології електромагнітного трекінгу, розглянути фізичні принципи злиття зображень мультипараметричної магнітно-резонансної томографії та трансректальної ультразвукової діагностики у реальному часі, проаналізувати методи реєстрації зображень, порівняти та дослідити наукові дані про ефективність fusion-біопсії та стандартної ультразвукової біопсії. Проаналізувати можливості пропедевтичного використання результатів дослідження у процесі підготовки магістрів медицини з урахуванням потреби інтегративного мультидисциплінарного підходу до діагностики та лікування захворювань такого типу.

Будова та патогенез передміхурової залози. Передміхурова залоза анатомічно розділена на три зони, що мають біологічні та гістологічні відмінності між собою: периферична зона (PZ), центральна зона (CZ) і перехідна зона (TZ). Клінічне

значення мають TZ і PZ зони, оскільки, саме в них спостерігається доброякісна гіперплазія або злоякісне переродження тканин передміхурової залози.

Периферична зона органу складається з альвеоларно-трубчастих залоз, що об'єднуються в ацинуси (структурно-функціональна одиниця передміхурової залози). Стінки ацинусів утворені двошаровим епітелієм. Внутрішній шар – це секреторні клітини циліндричної форми з добре розвиненим секреторним апаратом, оскільки їх основною функцією є синтез компонентів простатичного секрету, як PSA. Під ними знаходиться шар базальних клітин, що з'єднує секреторний шар з базальною мембраною, виконуючи опорну і регуляторну функції (рис. 1).

Строма (опорно-формоутворюючий і трофічний комплекс органу) представлена фіброзно-м'язовою тканиною з гладкими міоцитами, колагеновими та еластиновими волокнами. Порушення цієї організації лежить в основі патологічних процесів при захворюванні передміхурової залози (рис. 2) [3].

Онкологічні захворювання передміхурової залози пов'язані зі статевими залозами та чоловічими статевими гормонами – андрогенами, які виконують важливу функцію у рості й функціонуванні передміхурової залози. Але з віком кількість ферменту 5 α -редуктази збільшується, і це перетворює тестостерон у його більш активну форму – дигідротестостерон. Останній накопичується у біологічних тканинах залози, а його надлишок разом з інсуліноподібним фактором росту спонукає клітини до активного росту, що змушує

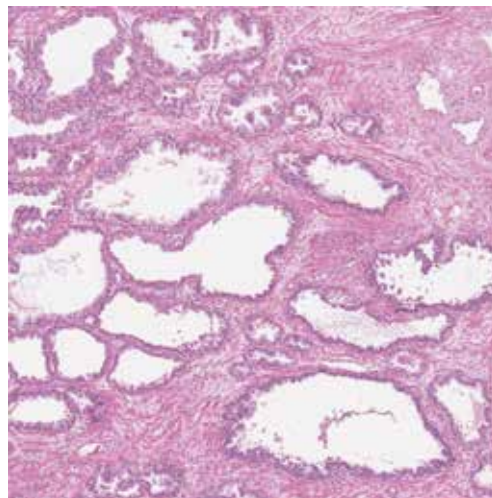


Рис. 1. Норма передміхурової залози

Джерело: Human Protein Atlas <https://www.proteinatlas.org/learn/dictionary/normal/Prostate>

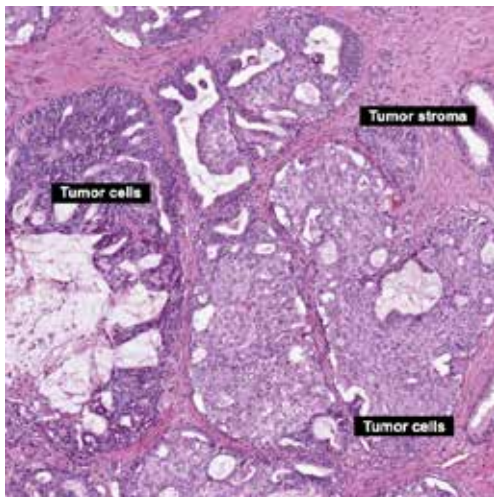


Рис. 2. Тканина передміхурової залози уражена онкологічним захворюванням

Джерело: Human Protein Atlas <https://www.proteinatlas.org/learn/dictionary/cancer/prostate+cancer>

їх активно продукувати білки. Таким чином, метаболічні процеси сприяють мутаціям, активації пухлинних процесів і, зрештою, формуванню РС.

Розвиток аденокарциноми передміхурової залози супроводжується десмопластичною реакцією (захисна реакція тканин на ріст пухлини) в мікросередовищі пухлини, яка відповідає за метастатичний процес пухлини (розповсюдження злоякісних клітин на інші тканини та органи) [4]. Колагенові волокна є важливими компонентами матриксу, що ремодулює мікросередовище, механічну жорсткість, топографію пухлини. Їх деградація сприяє послабленню опору тканин до ракових клітин і як наслідок інфільтрації пухлини (процес проникнення ракових клітин у здорові тканини, що в нормі мають іншу щільність), ангіогенезу (обростання пухлини новими судинами для живлення), інвазії (процес поширення ракових клітин у здорові) та міграції [5].

Прогресування патологічних змін супроводжується глибокою перебудовою структури органа. Деградація базального шару та втрата цілісності базальної мембрани зумовлюють інвазію пухлинних клітин у строму, що корелює з патологічною зміною секреції PSA. Варто зазначити, що патологічні процеси в органі, у цей час, впливають на жорсткість біологічних тканин, відіграючи важливу роль під час попереднього пальцевого ректального дослідження, а також при безпосередньому виконанні збору матеріалу для подальшого гістологічного дослідження. Тому для подолання похибок та забезпечення високої точності за допомогою програмного забезпечення розраховуються модулі пружності біологічних тканин для

того, щоб відрізнити пухлину від здорової біологічної тканини.

Механічні властивості біологічних тканин передміхурової залози. Розуміння сутності процесів, що відбуваються у біологічних тканинах передміхурової залози потребує інтегративного мультидисциплінарного у підготовці фахівців [8]. Ключовим біомеханічним маркером патологічного процесу є зростання концентрації колагенових волокон, що призводить до аномального підвищення жорсткості тканинного матриксу. Механічне напруження в пухлинному вузлі виникає внаслідок активного поділу клітин та їх міграції, що спричиняє тиск на твердотільні компоненти навколишнього середовища [6].

Кількісна оцінка цих змін проводиться методом еластографії, який базується на візуалізації поширення зсувних хвиль або аналізі локальних деформацій. Основним параметром оцінки є модуль поздовжньої пружності Юнга E , який визначає відношення між механічною напругою σ та відносною деформацією ε :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ (Па)} \quad (1)$$

Формула (1) випливає із закону Гука (2), який доводить, що механічне напруження в пружно деформованому тілі прямо пропорційна його відносній деформації [7, 9]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2)$$

Середнє значення комплексних показників модуля пружності Юнга передміхурової залози в нормі становить $(15,9 \pm 5,9)$ кПа, а при онкологічних захворюваннях $(40,4 \pm 15,7)$ кПа при частоті датчика 150 Гц.

Структурні зміни строми призводять до підвищення жорсткості тканинного матриксу та зростання модуля пружності Юнга майже у 2,5 рази в порівнянні з нормою [10]. Однак, класичного

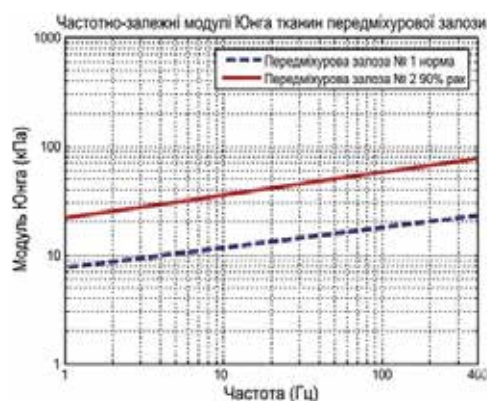


Рис. 3. Частотна залежність модуля Юнга тканин передміхурової залози

Джерело: 10.

лінійного закону Гука недостатньо для точного опису стану передміхурової залози під час інвазивних маніпуляцій. Передміхурова залоза, як і інші біологічні структури (м'язи, судини, сухожилля, легеневі тканини, шкіра тощо), являє собою в'язкопружну систему, тобто після механічного напруження орган має відновити свою форму шляхом релаксації напруги.

Релаксація напруги – явище зменшення з часом величини напруги (σ) в органі при підтримці постійної величини деформації (рис. 4) і біофізично пояснюється механічною моделлю Максвелла, за допомогою якої можна отримати експоненціальний закон релаксації напруги (3) [7].

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{t}{\alpha}} \quad (3)$$

де α – постійна часу релаксації, $\sigma_0 = E$ – початкова напруга.

Під час реальних інвазивних маніпуляцій на тканинах залози за допомогою УЗД датчика, який є комбінацією лінійного та конвексного типів [9], навантаження наростає поступово. При досягненні максимуму деформація фіксується (залишається незмінною), датчик зупиняється, і розпочинається процес релаксації напруги. Сучасні моделі біомеханіки вказують, що біологічні тканини належать до нелінійно – пружних (гіперпружних) матеріалів, тобто їх механічний відгук залежить від амплітуди деформації: при малих деформаціях, наприклад, пальцеве ректальне дослідження (DRE), тканина показуватиме одні показники жорсткості, а під тиском датчика УЗД або введенні біопсійної голки інші, через опір, який чинять колагенові волокна строми. Ця біомеханічна різниця призводить до зміщення пухлини під час fusion – біопсії, тому необхідно використовувати нелінійні параметри пружності, що описані моделями Нео-Гука, Муні-Рівліна та ін. [11]. Використання нелінійних моделей дозволяє мінімізувати помилку цільової

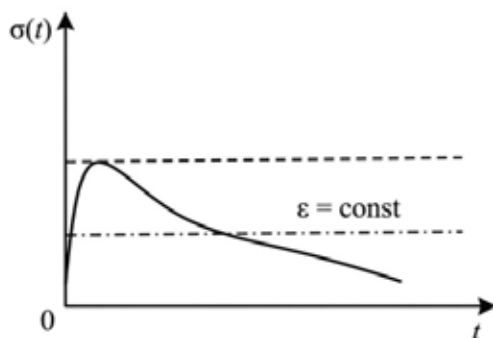


Рис. 4. Крива релаксації напруги

Джерело зображення: 7

навігації за рахунок компенсації деформаційного зміщення органа під дією зовнішнього тиску і їхнє практичне застосування стає критичним саме на етапі зіставлення даних [12]. Візуалізація патологічних ділянок виконується за допомогою mpMRI, проте отримані знімки є статичним зображенням, а передміхурова залоза під час проведення fusion – біопсії є динамічним об'єктом і, як наслідок, реальні координати в момент проведення процедури можуть не відповідати координатам на mpMRI. Для розв'язання цієї проблеми найбільш ефективним і точним є альтернативний метод біопсії злиття (ComBx).

Fusion-біопсія (за методом ComBx). Сучасна стратегія діагностики РС базується на багатоваріантному підході, що містить первинний скринінг (аналіз крові на простат-специфічний антиген (PSA)), пальцеве ректальне дослідження (DRE), візуалізацію підозрілих ділянок за допомогою трансректальної ультразвукової біопсії TRUS-Bx, mpMRI та fusion-біопсію (точковий забір тканини на гістологічне дослідження для оцінки пухлини та встановлення діагнозу). Традиційна трансректальна ультразвукова біопсія характеризується обмеженою чутливістю через низьку візуалістичну здатність щодо специфічних вогнищ неоплазії, тоді як fusion-біопсія (ComBx) забезпечує інтеграцію статичних даних mp-MRI із зображеннями TRUS-Bx, мінімізуючи ризики гіподіагностики клінічно значущих форм раку передміхурової залози.

В основі апаратно-програмного злиття ComBx лежать алгоритмічна обробка і зіставлення даних, отриманих за допомогою mpMRI із динамічним ультразвуковим потоком, де програмні платформи використовують складні алгоритми та математичні моделі реєстрації для відображення цільових зон у 3D просторі. Всі платформи злиття класифікуються за типом реєстрації зображень на жорстку (rigid) та еластичну (elastic). Жорстка реєстрація полягає у накладанні статичного зображення mpMRI на динамічне зображення TRUS без урахування морфологічних змін органа під час руху пацієнта або введення зонда TRUS, а еластична реєстрація навпаки намагається компенсувати цю деформацію, розраховуючи зміщення умовних точок, границь, анатомічних орієнтирів для забезпечення більшої точності, тому є біофізично досконалішою [13; 14; 15].

Під час проведення прицільної fusion – біопсії системи просторового трекінгу (відстеження) дозволяють оператору візуалізувати положення біопсійної голки відносно датчика у 3D просторі за допомогою технології електромагнітного від-

стеження. В основі цього методу лежить закон електромагнітної індукції Фарадея (4):

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} (B) \quad (4)$$

де ε – електрорушійна сила індукції, що виникає у датчику; N – кількість витків у соленоїді (невеликий датчик, що прикріплюється до датчика TRUS); $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ – швидкість зміни магнітного потоку.

Генерація змінного електромагнітного поля навколо пацієнта дозволяє обчислювати точні просторові координати соленоїда за характеристиками індукovanого струму, що обробляється та реконструюється програмним забезпеченням у 3D модель [16].

В сучасних наукових публікаціях, де порівнюється ефективність виявлення пухлин між методами ComBx та TRUS-Bx, автори наукових досліджень переконливо доводять, що у групах ComBx онкологія передміхурової залози підтверджується у 152 випадках (61%), в той час, як у групі TRUS-Bx – у 113 випадках (45%) [17]. Статистична значущість таких результатів, переконливо доводить високоточність та перевагу технологій fusion-біопсії (рис. 5) над традиційною ультразвуковою біопсією.

Висновок. Інтеграція біофізичних та цифрових технологій візуалізації дозволяє точно оцінити механічні властивості біологічних тканин та зміни їх біомеханічних маркерів, що є критично важливим і інформативним аспектом у діагностиці захворювань передміхурової залози. Оцінка біофізичних параметрів (модуля пружності Юнга, в'язкопружних властивостей тканин

передміхурової залози, релаксації напруги, електромагнітного відстеження) і застосування технологій fusion – біопсії дозволяє мінімізувати ризики гіподіагностики клінічно значущих форм раку. Оскільки розвиток аденокарциноми супроводжується патологічним ремоделюванням стромы, що призводить до зростання модуля Юнга майже у 2,5 рази порівняно з нормою, і є необхідність застосування гіперпружних моделей (Муні-Рівліна та ін.) для компенсації нелінійних деформацій органа під час інвазивних процедур. Застосування технології інтелектуального злиття зображень (ComBx) дозволяє підвищити точність верифікації клінічно значущих пухлин, що підтверджується клінічними дослідженнями у вітчизняних та іноземних фахових наукових джерелах. В Україні, з 2018 року і наразі, технологія fusion – біопсія (ComBx) активно використовується у провідних державних і приватних діагностично-хірургічних центрах і стала «золотим стандартом» в прицільній діагностиці онкологічних захворювань передміхурової залози.

Подяка. Висловлюємо глибоку вдячність Доктору філософії (PhD), завідувачу урологічного відділення КНП КОР «Київська обласна клінічна лікарня», члену Української та Європейської асоціацій урологів А. В. Корицькому за фахову рецензію статті, професійні поради та увагу до біофізичних аспектів дослідження патологій передміхурової залози.

Acknowledgments. The authors express their sincere gratitude to A. V. Korytskyi, PhD MD, Head of the Department of Urology at Kyiv Regional Clinical Hospital and member of the Ukrainian and European

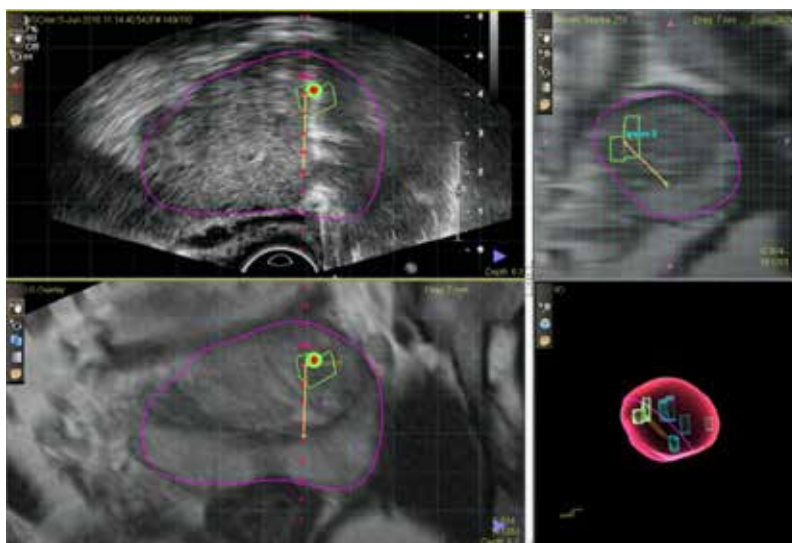


Рис. 5. Біопсія підозрілої зони передміхурової залози

Джерело зображення: <https://www.urospecialist.com.sg/article/mri-us-fusion-guided-biopsy-of-the-prostate-a-better-way-to-biopsy-the-prostate/>

Associations of Urology, for his professional review of the manuscript, valuable expert advice, and insightful comments on the biophysical aspects of prostate pathology research.

Список літератури:

1. Cancer in Ukraine, 2022-2023: Incidence, mortality, indicators of oncological service activity [Internet] / O. V. Yefimenko, Z. P. Fedorenko, O. V. Sumkina, A. Ryzhov, L. Goulak. *Bull National Cancer Registry Ukr* N25. Kropyvnytskyi: Polium, 2024. 65 p. URL: http://www.ncru.inf.ua/publications/BULL_25/index_e.htm.
2. The value of fusion biopsy in the diagnosis of localized tumors: A comparative analysis of MR-guided prostate biopsy methods / S. O. Vozianov et al. *Kharkiv Surgical School*. 2024. № 6. С. 64–73. DOI: 10.37699/2308-7005.6.2024.12.
3. Histological and quantitative analyzes of the stromal and acinar components of normal human prostate zones / E. F. Alves, B. L. M. de Freitas Ribeiro, W. S. Costa, C. B. M. Gallo, F. J. B. Sampaio. *The Prostate*. 2018. Vol. 78. P. 289–293. DOI: 10.1002/pros.23472.
4. Extracellular matrix secreted by reactive stroma is a main inducer of pro-tumorigenic features on LNCaP prostate cancer cells / A. Palumbo et al. *Cancer Letters*. 2012. Vol. 321, iss. 1. P. 55–64. DOI: 10.1016/j.canlet.2012.02.026.
5. Extracellular matrix structure / A. D. Theocharis, S. S. Skandalis, C. Gialeli, N. K. Karamanos. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2016. Vol. 97. P. 4–27. DOI: 10.1016/j.addr.2015.11.001.
6. Physical traits of cancer / H. T. Nia et al. *Science*. 2020. Vol. 370. Art. eaaz0868. DOI: 10.1126/science.aaz0868.
7. Медична та біологічна фізика: національний підручник / О. В. Чалий, Б. Т. Агапов, Н. В. Стучинська, К. О. Чалий та ін.; за ред. О. В. Чалого. Нова Книга, 2017. 526 с.
8. Стучинська Н.В., Шморгун А.В., Мороз Л.Ю. Інтеграція знань при вивченні природничо-наукових дисциплін у класах медичного та біологічного профілю. *Вісник Чернігівського національного педагогічного університету імені Т. Г. Шевченка. Серія: Педагогічні науки*. Чернігів, 2010. Вип. 77. С. 154–158.
9. Фізичні основи функціонування медичної апаратури. Практикум / за ред. Н. В. Стучинської. Книга-плюс, 2025. 126 с.
10. Quantitative characterization of viscoelastic properties of human prostate correlated with histology / M. Zhang et al. *Ultrasound in Medicine & Biology*. 2008. Vol. 34, iss. 7. P. 1033–1042. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2007.11.024.
11. Prostate biopsy tracking with deformation estimation / M. Baumann, P. Mozer, V. Daanen, J. Troccaz. *Medical Image Analysis*. 2012. Vol. 16, iss. 3. P. 562–576. DOI: 10.1016/j.media.2011.01.008.
12. A review on material models for isotropic hyper-elasticity / S. K. Melly, L. Liu, Y. Liu, J. Leng. *Int J Mech Syst Dyn*. 2021. Vol. 1. P. 71–88. DOI: 10.1002/msd2.12013.
13. Elastic Versus Rigid Image Registration in Magnetic Resonance Imaging–transrectal Ultrasound Fusion Prostate Biopsy: A Systematic Review and Meta-analysis / W. Venderink, M. de Rooij, J. P. M. Sedelaar, H. J. Huisman, J. J. Fütterer. *European Urology Focus*. 2018. Vol. 4, iss. 2. P. 219–227. DOI: 10.1016/j.euf.2016.07.003.
14. Clinical application of a 3D ultrasound-guided prostate biopsy system / S. Natarajan et al. *Urologic Oncology: Seminars and Original Investigations*. 2011. Vol. 29, iss. 3. P. 334–342. DOI: 10.1016/j.urolonc.2011.02.014.
15. Prospective Randomized Trial Comparing Magnetic Resonance Imaging (MRI)-guided In-bore Biopsy to MRI-ultrasound Fusion and Transrectal Ultrasound-guided Prostate Biopsy in Patients with Prior Negative Biopsies / C. Arsov et al. *European Urology*. 2015. Vol. 68, iss. 4. P. 713–720. DOI: 10.1016/j.eururo.2015.06.008.
16. Magnetic Resonance Imaging-Ultrasound Fusion-Guided Prostate Biopsy: Review of Technology, Techniques, and Outcomes / M. Kongnyuy, A. George, A. R. Rastinehad, P. A. Pinto. *Curr Urol Rep*. 2016. Vol. 17, iss. 4. Art. 32. DOI: 10.1007/s11934-016-0589-z.
17. Enhancing Prostate Cancer Diagnosis: A Comparative Analysis of Combined Fusion and Systematic Biopsy Methods – A Single-Center Study / E. Kania et al. *Journal of Clinical Medicine*. 2025. Vol. 14, iss. 8. Art. 2822. DOI: 10.3390/jcm14082822.

References:

1. Yefimenko, O. V., Fedorenko, Z. P., Sumkina, O. V., Ryzhov, A., & Goulak, L. (2024). *Cancer in Ukraine, 2022–2023: Incidence, mortality, indicators of oncological service activity* (Bulletin of National Cancer Registry of Ukraine No. 25). Polium. inf.ua
2. Vozianov, S. O., et al. (2024). The value of fusion biopsy in the diagnosis of localized tumors: A comparative analysis of MR-guided prostate biopsy methods. *Kharkiv Surgical School*, (6), 64–73. doi.org
3. Alves, E. F., de Freitas Ribeiro, B. L. M., Costa, W. S., Gallo, C. B. M., & Sampaio, F. J. B. (2018). Histological and quantitative analyzes of the stromal and acinar components of normal human prostate zones. *The Prostate*, 78(4), 289–293. doi.org
4. Palumbo, A., et al. (2012). Extracellular matrix secreted by reactive stroma is a main inducer of pro-tumorigenic features on LNCaP prostate cancer cells. *Cancer Letters*, 321(1), 55–64. doi.org
5. Theocharis, A. D., Skandalis, S. S., Gialeli, C., & Karamanos, N. K. (2016). Extracellular matrix structure. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 97, 4–27. doi.org
6. Nia, H. T., Munn, L. L., & Jain, R. K. (2020). Physical traits of cancer. *Science*, 370(6516), Article eaaz0868. doi.org
7. Chalyi, O. V., Agapov, B. T., Stuchynska, N. V., & Chalyi, K. O. (2017). *Medychna ta biolohichna fizyka* [Medical and biological physics] (O. V. Chalyi, Ed.). Nova Knyha.

8. Suchynska N.V., Shmorhun A.V., Moroz L.Iu. Intehratsiia znan pry vyvchenni pryrodnycho-naukovykh dystsyplin u klaskakh medychnoho ta biolohichnoho profilu. Visnyk Chernihivskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni T. H. Shevchenka. Seriia: Pedahohichni nauky. Chernihiv, 2010. Vyp. 77. S. 154–158.
9. Stuchynska, N. V. (Ed.). (2025). *Fizychni osnovy funktsionuvannia medychnoi aparatury. Praktykum* [Physical foundations of medical equipment functioning: A practical guide]. Knyha-Plus.
10. Zhang, M., et al. (2008). Quantitative characterization of viscoelastic properties of human prostate correlated with histology. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 34(7), 1033–1042. doi.org
11. Baumann, M., Mozer, P., Daanen, V., & Troccaz, J. (2012). Prostate biopsy tracking with deformation estimation. *Medical Image Analysis*, 16(3), 562–576. doi.org
12. Melly, S. K., Liu, L., Liu, Y., & Leng, J. (2021). A review on material models for isotropic hyper-elasticity. *International Journal of Mechanical System Dynamics*, 1(1), 71–88. doi.org
13. Venderink, W., de Rooij, M., Sedelaar, J. P. M., Huisman, H. J., & Fütterer, J. J. (2018). Elastic versus rigid image registration in magnetic resonance imaging–transrectal ultrasound fusion prostate biopsy: A systematic review and meta-analysis. *European Urology Focus*, 4(2), 219–227. doi.org
14. Natarajan, S., et al. (2011). Clinical application of a 3D ultrasound-guided prostate biopsy system. *Urologic Oncology: Seminars and Original Investigations*, 29(3), 334–342. doi.org
15. Arsov, C., et al. (2015). Prospective randomized trial comparing magnetic resonance imaging (MRI)-guided in-bore biopsy to MRI-ultrasound fusion and transrectal ultrasound-guided prostate biopsy in patients with prior negative biopsies. *European Urology*, 68(4), 713–720. doi.org
16. Kongnyuy, M., George, A. K., Rastinehad, A. R., & Pinto, P. A. (2016). Magnetic resonance imaging-ultrasound fusion-guided prostate biopsy: Review of technology, techniques, and outcomes. *Current Urology Reports*, 17(4), Article 32. doi.org
17. Kania, E., et al. (2025). Enhancing prostate cancer diagnosis: A comparative analysis of combined fusion and systematic biopsy methods – A single-center study. *Journal of Clinical Medicine*, 14(8), Article 2822. doi.org

Дата першого надходження статті до видання: 01.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 14.09.2026