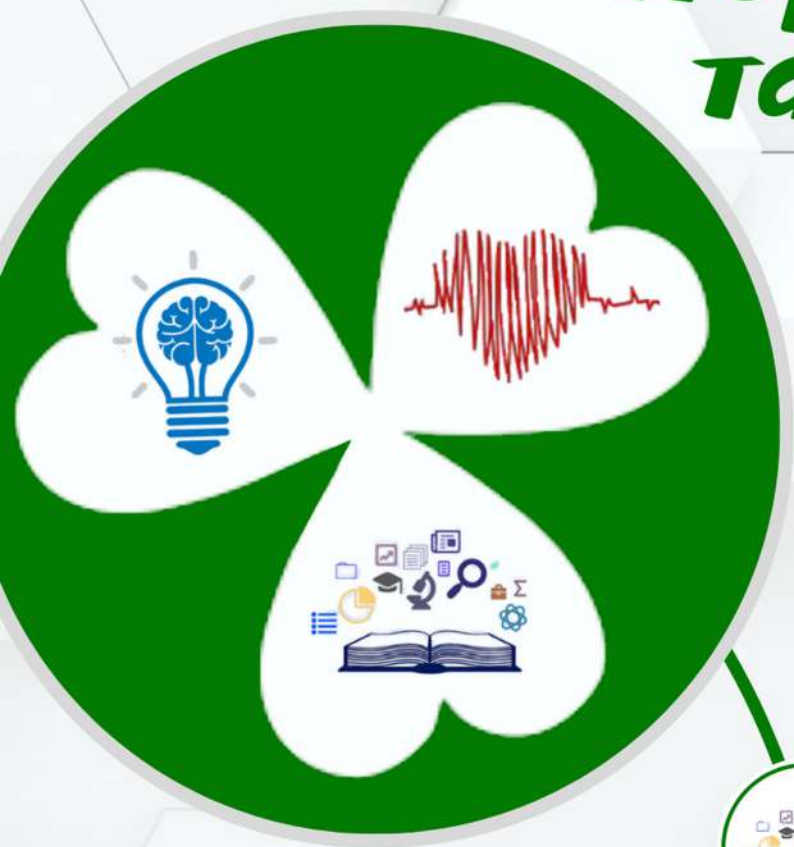




Наукові перспективи
Видавнича група

Перспективи та інновації науки



№4(62) 2026

Тернопільський національний медичний університет імені І. Я. Горбачевського

Видавнича група «Наукові перспективи»

Луганський державний медичний університет

Громадська наукова організація «Система здорового довголіття в мегаполісі»

Християнська академія педагогічних наук України

Всеукраїнська асоціація педагогів і психологів з духовно-морального виховання

*за сприяння КНП "Клінічна лікарня №15 Подільського району м.Києва",
Центру дієтології Наталії Калиновської*

«Перспективи та інновації науки»

№ 4(62) 2026

Київ – 2026

Ivan Horbachevsky Ternopil National Medical University

Publishing Group «Scientific Perspectives»

Luhansk State Medical University

Public scientific organization "System of healthy longevity in the metropolis"

Christian Academy of Pedagogical Sciences of Ukraine

**All-Ukrainian Association of Teachers and Psychologists of Spiritual and Moral
Education**

*with the assistance of the KNP "Clinical Hospital No. 15 of the Podilsky District of Kyiv",
Nutrition Center of Natalia Kalinovska*

"Prospects and innovations of science"

№ 4(62) 2026

Kyiv – 2026

ISSN 2786-4952 Online

УДК 001.32:1/3](477)(02)

Ідентифікатор медіа - R40-05846

DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-4952-2026-4\(62\)](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2026-4(62))

«Перспективи та інновації науки»: журнал. 2026. № 4(62) 2026. С. 4280



Згідно наказу Міністерства освіти і науки України від 27.09.2021 № 1017 журналу присвоєно категорію "Б" із психології та педагогіки

Згідно наказу Міністерства освіти і науки України від 27.04.2023 № 491 журналу присвоєно категорію "Б" із медицини: спеціальність 222

*Рекомендовано до видавництва Президією громадської наукової організації
«Всеукраїнська Асамблея докторів наук з державного управління» (Рішення від 16.04..2026, № 6/4-26)*

*Журнал видається за підтримки КНП "Клінічна лікарня №15 Подільського району м.Києва",
Центру дієтології Наталії Калиновської*



Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus (IC), Research Bible, міжнародної пошукової системи Google Scholar

Електронний науковий журнал «Перспективи та інновації науки» заснований з метою висвітлення актуальних питань теорії та практики медицини, біології, біотехнології та реабілітації в Україні, за кордоном. Видання розраховано на науковців, викладачів, педагогів-практиків, представників органів державної влади та місцевого самоврядування, здобувачів вищої освіти, громадсько-політичних діячів

Згідно Порядку формування Переліку наукових фахових видань України, затвердженого наказом МОН України від 15.01.2018 № 32, повнотекстовий доступ до наукових статей журналу представлений на платформі «Наукова періодика України» в Національній бібліотеці України імені В.І. Вернадського НАН України та в Національному репозитарії академічних текстів

Голова редакційної колегії:



Вадзюк Степан Несторович - доктор медичних наук, професор, завідувач кафедри фізіології з основами біоетики та біобезпеки Тернопільського національного медичного університету імені І.Я.Горбачевського Міністерства охорони здоров'я України (Україна)

Заступник голови редакційної колегії: Торяник Інна Іванівна - доктор медичних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник лабораторії вірусних інфекцій Державної установи «Інститут мікробіології та імунології імені І.І. Мечникова Національної академії медичних наук України» (Харків, Україна)

Редакційна колегія:

1. **Алієв, Ельнур М.** доктор медичних наук, професор, професор Азербайджанського медичного університету (Азербайджан)
2. **Бабова Ірина Костянтинівна** - доктор медичних наук, професор, старший науковий співробітник відділу економічного регулювання природокористування ДУ "Інститут ринку і економіко-екологічних досліджень Національної академії наук України", лікар ФРМ (фізичної та реабілітаційної медицини) ДУ "Територіальне медичне об'єднання МВС України по Одеській області" (Одеса, Україна)

3. **Галандаров, Вагіф Календер** Доктор медичних наук, доктор філософії, професор, професор кафедри хірургічних захворювань Азербайджанського медичного університету (Азербайджан)
4. **Гарасєв, Ельдар Абдулла** доктор медичних наук, професор кафедри загальної та токсикологічної хімії, Заступник директора Азербайджанського медичного університету (Азербайджан)
5. **Ельдар Елієв** доктор медичних наук, професор, професор кафедри хірургічних захворювань Азербайджанського медичного університету (Азербайджан)
6. **Жуков Валері**, Університет Миколи Коперника в Торуні (Торунь, Польща)
7. **Іншакова Ганна Вадимівна** – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри громадського здоров'я Національного медичного університету імені О.О. Богомольця (Київ, Україна)
8. **Кернас Андрій В'ячеславович** – доктор філософії в галузі психології, кандидат психологічних наук, дійсний член Української психолгічної асоціації, магістр права, магістр педагогіки, доцент кафедри Практичної психології Одеського національного морського університету, старший викладач кафедри мовної та психолого-педагогічної підготовки Одеського національного економічного університету (Одеса, Україна)
9. **Коваль Галина Миколаївна** - доктор медичних наук, професор, завідувач кафедри мікробіології, вірусології, епідеміології з курсом інфекційних хвороб Ужгородського національного університету (Ужгород, Україна)
10. **Корильчук Неоніла Іванівна** – кандидат медичних наук, доцент кафедри терапії та сімейної медицини Тернопільського національного медичного університету імені І.Я. Горбачевського МОЗ України (Тернопіль, Україна)
11. **Левков Анатолій Анатолійович** - кандидат медичних наук, доцент кафедри фізичної терапії та ерготерапії Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», доцент кафедри онкології, радіаційної медицини та радіології Полтавського державного медичного університету (Полтава, Україна)
12. **Мочалов Юрій Олександрович** - доктор медичних наук, професор, професор кафедри хірургічної стоматології та клінічних дисциплін ДВНЗ «Ужгородський національний університет» (Ужгород, Україна)
13. **Олійник Світлана Валентинівна** - кандидат фармацевтичних наук, доцент, доцент кафедри аптечної технології ліків Національного фармацевтичного університету
14. **Пасько Ольга Миколаївна** - доктор юридичних наук, професор, професор кафедри психології та педагогіки, Одеський державний університет внутрішніх справ.(Одеса, Україна)
15. **Помиткіна Любов Віталіївна** — доктор психологічних наук, професор, завідувач кафедри авіаційної психології Національного авіаційного університету (Київ, Україна)
16. **Теренда Наталія Олександрівна** - доктор медичних наук, професор, т.в.о завідувача кафедри громадського здоров'я та управління охороною здоров'я Тернопільського національного медичного університету імені І.Я. Горбачевського МОЗ України (Тернопіль, Україна)
17. **Черська Марія Сергіївна** - доктор медичних наук, завідувачка консультативно-діагностичним відділенням Державної Установи «Інститут ендокринології та обміну речовин НАМН України» (Київ, Україна)
18. **Шульгай Аркадій Гаврилович** - доктор медичних наук, професор, професор кафедри громадського здоров'я та управління охороною здоров'я Тернопільського національного медичного університету імені І.Я. Горбачевського МОЗ України (Україна)

Статті розміщені в авторській редакції. Відповідальність за зміст та орфографію поданих матеріалів несуть автори.

- Патратій М.В., Кантемир А.М.** **2729**
ПАТОГЕНЕТИЧНІ ЧИННИКИ ТА ФАКТОРИ РИЗИКУ ВИНИКНЕННЯ ДИВЕРТИКУЛЯРНОЇ ХВОРОБИ
- Пашковський В.М.** **2736**
СКРИНІНГ ПОСТТРАВМАТИЧНИХ СИМПТОМІВ В УМОВАХ ВІЙНИ В УКРАЇНІ: ЗАСТОСУВАННЯ КОРОТКОЇ ШКАЛИ SSS-PTSD
- Первак М.П., Годлевський Л.С., Марченко С.В.** **2744**
ПРОТИСУДОМНИЙ ВПЛИВ ТРАНСКРАНІАЛЬНОГО НИЗЬКОІНТЕНСИВНОГО ПУЛЬСУЮЧОГО УЛЬТРАЗВУКУ (НПУ) ТА КАРБОНОВИХ НАНОТРУБОК НА МОДЕЛІ ПЕНТИЛЕНЕТЕТРАЗОВОГО (ПТЗ) КІНДЛІНГА
- Покришко О.В., Лукович З.** **2755**
СУЧАСНІ АСПЕКТИ ЕПІДЕМІОЛОГІЇ, ЛАБОРАТОРНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТА СТРАТЕГІЇ АНТИБІОТИКОТЕРАПІЇ ІНФЕКЦІЙ КРОВОТОКУ: СИСТЕМАТИЧНИЙ ОГЛЯД (2020–2025)
- Попадинець О.Г., Гаргаун О.Т.** **2769**
ГІПОТИРЕОЗІНДУКОВАНІ ЗМІНИ В НАДНИРКОВИХ ЗАЛОЗАХ В УМОВАХ ЕКСПЕРИМЕНТУ
- Постовітенко К.П., Семенюк Р.О., Барська Ю.М., Бушмельова Г.П.** **2781**
МУЛЬТИДИСЦИПЛІНАРНА ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНА МОДЕЛЬ ОРТЕЗУВАННЯ З ПСИХОЛОГІЧНИМ СУПРОВОДОМ: РОЗРОБКА ТА КЛІНІЧНА АПРОБАЦІЯ ІНДІВІДУАЛІЗОВАНОЇ ПРОГРАМИ ПІДГОТОВЧИХ ВПРАВ
- Процайло М.Д., Басараб В.В., Волков Р.К., Михайлишин І.І.** **2792**
ГОСТРА КИШКОВОЇ НЕПРОХІДНІСТЬ У ДІТЕЙ: КЛІНІЧНИЙ ВИПАДОК ОБТУРАЦІЇ СТОРОННІМИ ТІЛАМИ ТА РОЛЬ МЕДСЕСТРИНСЬКОГО ДОГЛЯДУ
- Процайло М.Д., Мігенько О.Б., Зубніна Ю.О., Воронцова Т.О., Рогальська Я.В.** **2802**
КЛІНІЧНИЙ ВИПАДОК УРОДЖЕНИХ ПАТОЛОГІЙ ХРЕБТА
- Рисована Л.М., Григорук В.В., Гранкіна С.С., Буряченко Н.О., Астапова Я.В.** **2810**
ПРОТЕЗУВАННЯ НА ОСНОВІ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ, БІОМЕХАНІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РЕАБІЛІТАЦІЇ

УДК 616.853-092.9:615.837:546.26-162

[https://doi.org/10.52058/2786-4952-2026-4\(62\)-2744-2754](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2026-4(62)-2744-2754)

Первак Михайло Павлович кандидат медичних наук, доцент, доцент кафедри симуляційних медичних технологій Одеського національного медичного університету, м. Одеса, <https://orcid.org/0000-0002-0360-5756>

Годлевський Леонід Семенович заслужений діяч науки і техніки України, доктор медичних наук, професор, завідувач кафедри фізіології, патологічної фізіології, медичної фізики та інформатики Одеського національного медичного університету, м. Одеса, <https://orcid.org/0000-0003-0935-8255>

Марченко Сергій Валерійович старший викладач кафедри фізіології, патологічної фізіології, медичної фізики та інформатики Одеського національного медичного університету, м. Одеса, <https://orcid.org/0000-0001-9247-7583>

ПРОТИСУДОМНИЙ ВПЛИВ ТРАНСКРАНІАЛЬНОГО НИЗЬКОІНТЕНСИВНОГО ПУЛЬСУЮЧОГО УЛЬТРАЗВУКУ (НПУ) ТА КАРБОНОВИХ НАНОТРУБОК НА МОДЕЛІ ПЕНТИЛЕНЕТЕТРАЗОЛОВОГО (ПТЗ) КІНДЛІНГА

Актуальність. Епілепсія є одним із найтяжчих захворювань головного мозку і, не зважаючи на значений арсенал протиепілептичних препаратів, третина хворих страждає на фармакологічно резистентну форму захворювання. Тому пошук альтернативних методів контролю епілептогенного збудження є важливим науково-практичним завданням. Одним із підходів є застосування неінвазивного транскраніального впливу низькоінтенсивним пульсуючим ультразвуком (НПУ), який також може виступати в якості фактора механічного вивільнення протиепілептичних препаратів з наночастинок в локальних ділянках епілептизованого мозку.

Мета роботи. Дослідити судомні прояви у щурів із ПТЗ-індукованим кіндлінгом за умов застосування НПУ, а також застосування НПУ на тлі введення карбонових наночастинок (КНЧ), навантажених гама-аміномасляною кислотою (ГАМК).

Матеріали та методи. Дослідження виконали на 31 статевозрілому щурі лінії Вістар. Хронічний епілептичний синдром відтворювали методом ПТЗ-індукованого кіндлінгу (35,0 мг/кг, в/очер, кожні 48 г, всього 18 ін'єкцій). Тварин розподілили на групи: з хибними впливами НПУ та введенням КНЧ без ГАМК, щурів із введенням КНЧ з ГАМК та щурів із застосуванням НПУ, а також групи щурів із сумісним застосуванням НПУ та КНЧ завантажених ГАМК. Параметри

LIPUS: частота 1,5 МГц, інтенсивність 30 мВт/см², тривалість сеансу 15 хв на ліву півкулю головного мозку.

Проводили реєстрацію та оцінку тяжкості поведінкових судом, а також реєстрацію електричної активності мозку в структурах фронтальної кори та вентрального гіпокампу. Статистичну обробку проводили методом ANOVA з post-hoc Tukey's HSD тестом.

Результати та наукова новизна. Латентний період в групі із сумісним застосуванням НППУ та КНЧ перевищував показник в групі контролю на 22,9% ($P=0,001$), а також перевищував показник в групі із одним застосуванням КНЧ на 17,1% ($P=0,01$).

Тяжкість судом у щурів на тлі одностороннього впливу НППУ на тлі введення наночастинок була достовірно меншою у порівнянні до підгруп, як з окремим застосуванням наночастинок, так і з окремими застосуванням НППУ при $N=10,653$, $df=3$; $P=0,0138$. На тлі сумісного застосування досліджуваних чинників генералізовані судоми спостерігали у одного щура із восьми, в той час як в групі контролю подібна тяжкість судом (4-5 балів) реєструвалась у більшості тварин (5 із 7).

Іктальні потенціали пригнічувались у щурів із попереднім застосуванням КНЧ в півкулі за одностороннім впливом НППУ, що свідчить про вивільнення ГАМК під впливом НППУ.

Висновки. Короткотривалий однократний вплив НППУ на структури головного мозку лівої півкулі, а також окреме застосування КНЧ навантажених ГАМК не викликають пригнічення ПТЗ-індукованих судом. Сумісне застосування КНЧ навантажених ГАМК та НППУ викликає подовження латентного періоду виникнення та пригнічення як поведінкових, так і електрографічних проявів судомної активності у щурів із ПТЗ-кіндлінгом.

Ключові слова: епілесія, кіндлінг, судоми, низькоінтенсивний пульсуючий ультразвук, карбонові наночастинок, транскраніальна стимуляція, головний мозок.

Mykhailo Pervak Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Simulation Medical Technologies, Odesa National Medical University, Odesa, <https://orcid.org/0000-0002-0360-5756>

Leonid Godlevsky Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department of Physiology, Pathological Physiology, Medical Physics and Informatics, Odesa National Medical University, Odesa, <https://orcid.org/0000-0003-0935-8255>

Serhii VMarchenko Senior Lecturer of the Department of Physiology, Pathological Physiology, Medical Physics and Informatics, Odesa National Medical University, Odesa, <https://orcid.org/0000-0001-9247-7583>

ANTICONVULSANT EFFECT OF TRANSCRANIAL LOW-INTENSITY PULSED ULTRASOUND (LIPUS) AND CARBON NANOTUBES IN THE PENTYLENETETRAZOLE (PTZ) KINDLING MODEL

Abstract. Background. Epilepsy is one of the most severe brain disorders. Despite a significant arsenal of antiepileptic drugs, one-third of patients suffer from pharmacoresistant forms of the disease.

Therefore, the search for alternative methods to control epileptogenic excitation is a crucial scientific and practical task. One promising approach is the use of non-invasive transcranial low-intensity pulsed ultrasound (LIPUS), which can also act as a trigger for the mechanical release of antiepileptic drugs from nanoparticles in localized epileptogenic areas of the brain.

Aim. To investigate seizure manifestations in rats with PTZ-induced kindling under the application of LIPUS, as well as the combined application of LIPUS and carbon nanotubes (CNTs) loaded with gamma-aminobutyric acid (GABA).

Material and methods. The study was conducted on 31 adult Wistar rats. Chronic epileptic syndrome was induced by the PTZ kindling method (35.0 mg/kg, intraperitoneally, every 48 hours, total of 18 injections). The animals were divided into groups: sham LIPUS with unloaded CNTs, GABA-loaded CNTs without LIPUS, LIPUS without CNTs, and combined application of LIPUS and GABA-loaded CNTs. LIPUS parameters: 1.5 MHz frequency, 30 mW/cm² intensity, 15 min duration applied to the left hemisphere. Behavioral seizure severity and brain electrical activity in the frontal cortex and ventral hippocampus were recorded. Statistical analysis was performed using ANOVA with Tukey's HSD post-hoc test.

Results. The latent period in the group with combined LIPUS and GABA-loaded CNTs exceeded the control group by 22.9% ($P=0.001$) and the CNT-only group by 17.1% ($P=0.01$). Seizure severity in rats receiving combined LIPUS and loaded nanoparticles was significantly lower compared to subgroups with separate application of either nanoparticles or LIPUS ($H=10.653$, $df=3$; $P=0.0138$).

Generalized seizures were observed in only one out of eight rats in the combined group, whereas the majority of control animals (5 out of 7) exhibited severe seizures (4-5 points).

Ictal potentials were significantly suppressed in the hemisphere subjected to combined CNT and LIPUS application, indicating the targeted release of GABA under ultrasound influence.

Conclusions. Short-term single application of LIPUS to the left hemisphere, as well as the separate application of GABA-loaded CNTs, do not suppress PTZ-induced seizures. The combined application of GABA-loaded CNTs and LIPUS prolongs the seizure latency period and suppresses both behavioral and electrographic manifestations of seizure activity in PTZ-kindled rats.

Key words: epilepsy, kindling, seizures, low-intensity pulsed ultrasound, carbon nanoparticles, transcranial stimulation, brain.

Постановка проблеми

Вплив низькоінтенсивним пульсуючим ультразвуком (НПУ) (1,5 мГц, 30 мВт/см², період впливу 200 мкс з частотою періодів 1,0 кГц) викликає значні зміни біологічних тканин без розвитку термічних ефектів. Основним в механізмах реалізації ефектів НПУ є активація механорецепторів з наступним залученням внутрішньоклітинних сигнальних систем [11, 12]. Зокрема НПУ викликає пригнічення запалення, яке реалізується за рахунок модуляції системи ендогенних проти- та прозапальних цитокинів, активації внутрішньоклітинного шляху, який ініціює внутрішньоядерний фактор-κВ (NF-κB) [8], а також активації механізмів нейропротекції [11]. Визначено також НПУ-індуковану індукцію мезенхімальних клітин, фібробластів через залучення Rho/ROCK, а також p38 MAPK - сигнальних шляхів, що забезпечує пришвидшення регенерації пошкоджених тканин [12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останнім часом встановлено ефективність НПУ у відношенні до попередження нейродегенерації, пригнічення апоптозу, а також покращення когнітивних функцій під впливом його транскраніального застосування, що складає значну перспективу в лікуванні захворювань головного мозку, зокрема при епілепсії [3]. Зважаючи на фармакологічну резистентність епілепсії у третини хворих, важливим є вивчення розвитку хронічного епілептичного синдрому, модельованого методом ПТЗ-кіндлінгу за умов застосування НПУ.

Також одним із важливих механізмів неінвазивного впливу НПУ на головний мозок є підвищення проникності гемато-енцефалічного бар'єру (ГЕБ), що може забезпечувати підвищення локальної концентрації нейротропних препаратів [4]. Зважаючи на розробку методів локальної доставки препаратів до ділянок головного мозку, вивільнення яких здійснюється застосуванням ультразвукових хвиль [1, 2].

Мета статті - вивчення судомних проявів у щурів із ПТЗ-індукованим кіндлінгом за умов застосування НПУ, а також застосування НПУ на тлі введення карбонових наночастинок (КНЧ), навантажених гама-аміномасляною кислотою (ГАМК).

Виклад основного матеріалу

Матеріал та методи дослідження. Дослідження провели на 31 статевозрілому щурі лінії Вістар (віком три місяці). Тварини знаходились за стандартних умов віварію Одеського національного медичного університету при постійній температурі 23°C, 60% вологості, 12-годинній зміні освітлення, вільним доступом до води та стандартною дієтою.

Експериментальні процедури виконували відповідно до вимог Гельсінської декларації (Directive 86/609/EEC) та вимог Національного Інституту Здоров'я США щодо поводження з експериментальними тваринами. Протокол дослідження схвалено Комісією з Біоетики Одеського національного медичного університету (Протокол № 1, 14.03.2022).

Модель хронічного епілептичного синдрому. Кіндлінг моделювали шляхом застосування ПТЗ (P6500, Sigma-Aldrich, США) розчиняли в 0,9% NaCl ex tempore і застосовували внутрішньочеревинно (в/очер) дозою 35,0 мг/кг кожні 48 годин - всього 18 ін'єкцій [6]. До спостереження включали щурів із розвиненими генералізованими судомними проявами. Щурам групи контролю (інтактні тварини) щодобово вводили 0,9% фізіологічний розчин NaCl. Після кожної ін'єкції щурів спостерігали індивідуально в прозорих ізольованих камерах протягом 30 хв, оцінку тяжкості судом проводили за прийнятою шестибальною шкалою [6].

Кіндлінгових щурів розподілили в наступні експериментальні групи:

Хибні впливи НІПУ + в/очер КНЧ без ГАМК (7 щурів);

Хибні впливи НІПУ + в/очер КНЧ з ГАМК (8 щурів);

Вплив НІПУ + в/очер застосування КНЧ без ГАМК (8 щурів);

Вплив НІПУ + в/очер застосування КНЧ з ГАМК (8 щурів);

Оперативні втручання та реєстрація ЕЕГ. У п'яти щурів з кожної групи під кетаміновою анестезією (100 мг/кг, в/очер., "Фармак", Україна) виконували імплантацію реєструючих електродів в структури мозку. Щурів фіксували в стереотаксичному апараті "СЕЖ-5", імплантували ніхромові монополярні електроди (0,15 мм) в структури вентрального гіпокампу (AP=-4,3; ML=4,5; DV=-8,0) а також фронтальної кори (AP=1,7; ML=2,0; DV=-1,0) обох гемісфер у відповідності до стереотаксичних координат. Референтний електрод імплантували в носові кістки. Електроди фіксували до поверхні черепа за допомогою зубної пластмаси типу "Норакріл" таким чином, щоб в лівій півкулі між електродами можливо було розмістити вихід коліматора (діаметр 4, мм). 5.0 мл 0.9% фізіологічного розчину NaCl вводили після оперативного втручання з метою попередження дегідратації, а також кожні 12 г протягом 48 г внутрішньом'язово вводили розчин калієвої солі пеніциліну (100,000 МО/кг). Після 10-14 добової реабілітації щурів залучали до спостереження. Електричну активність мозку реєстрували за допомогою комп'ютерної електрографічної системи "Neuropack Four" (Nihon Kohden, Японія) при частоті опитування каналів 256 Гц. Постійна часу складала 0,1 с. Електроенцефалограми аналізували offline візуально після видалення артефактів.

Вплив НІПУ. Перед фіксацією в стереотаксичному апараті щурам з метою анестезії застосовували внутрішньочеревинно кетамін дозою 80,0 мг/кг у поєднанні з ксилазином дозою 10,0 мг/кг [13]. Після фіксації щурам видаляли шерсть шляхом ретельного гоління, після чого наносили ультразвуковий гель і спрямовували коліматор на зону проекції гіпокампа лівої півкулі головного мозку впливу параметрами НІПУ 1,5 МГц, інтенсивністю 30 мВт/см², тривалість активного періоду впливу 200 мс, проміжок між періодами впливу 800 мс, загальна тривалість сеансу складала 15,0 хв. Для генерування електричних імпульсів зазначених параметрів використовували апарат SDG 2082X, (Siglent Technologies Germany GmbH, Німеччина). Після посилення за допомогою підсилювача на основі ЕРС 9083, (США), сигнал передавали на ультразвуковий трансдюсер (V301-SU; Olympus, Японія).

Діаметр отвору коліматора, який контактував з поверхнею черепа становив 4,0 мм і центр отвору розташовували на рівні $AP = -2.5$ мм, і $ML = 2.0$ мм. Сеанс впливу тривав 15,0 хв на ліву півкулю. Щурам групи контролю виконували такі ж процедури без запуску генератора НПУ.

Застосування КНЧ. Навантаження КНЧ без формування ковалентних зв'язків здійснювали за протоколом [10] з обов'язковим відмиванням незв'язаних з КНЧ молекул ГАМК [14] та відповідно до раніше розробленої технології [1, 2].

Статистичний аналіз даних виконували за допомогою програмного пакету SPSS для Windows (SPSS Inc., версія 21.0, США). Для порівняння показників між групами застосовували однофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA) з подальшим використанням критерію Тьюкі (post-hoc Tukey's HSD тест). Результати вважали статистично значущими при $P < 0,05$. Отримані дані навели у вигляді середньої величини та середньоквадратичного відхилення ($M \pm SD$).

Результати дослідження та їх обговорення. Порівняння тривалості латентного періоду перших судом визначило наявність статистичних відмінностей між групами при $F=7,116$, $df=3,30$; $P=0,0011$ (Табл. 1). Латентний період в групі із сумісним застосуванням НПУ та КНЧ перевищував показник в групі контролю на 22,9% ($P=0,001$), а також перевищував показник в групі із одним застосуванням КНЧ на 17,1% ($P=0,01$). Слід також зазначити, що латентність судом у щурів із сумісним застосуванням чинників була вищою від такої в групі із застосуванням НПУ на 12,7% ($P=0,081$) (Табл. 1).

Таблиця 1.

Вплив КНЧ та НПУ на розвинені ПТЗ-індуковані
кіндлінгові генералізовані судом (M±SD)

	Групи спостереження	Латентний період судом (секунди)	Тяжкість судом (бали)					P (Kruskal Wallis+ Dunn)
			1	2	3	4	5	
1	Контроль (ПТЗ, 35,0 мг/кг, в/очер) (n=7)	$62,7 \pm 4,7$	-	-	2	2	3	
2	Введення КНЧ (n=8)	$67,4 \pm 6,2$	-	-	3	4	1	$>0,05$ vs контроль
3	НПУ (n=8)	$71,0 \pm 5,8$	-	-	4	3	1	$>0,05$ vs контроль
4	НПУ+ введення КНЧ (n=8)	$81,3 \pm 7,3$ *#@	-	4	3	1	-	$P_1 - P_4 = 0,002$ $P_2 - P_4 = 0,016$ $P_3 - P_4 = 0,036$

Примітки: *- $P < 0,01$ – порівняно до контролю; #- $P < 0,05$ – порівняно з групою окремого введення КНЧ (Група 2); @- $P < 0,05$ порівняно з групою окремого застосування НІПУ (Група 3) (ANOVA + Tukey HSD тест).

Порівняння тяжкості судом за умов одностороннього впливу НІПУ засвідчило наявність статистичних відмінностей між групами при $N=10,653$, $df=3,30$; $P=0,0138$. При цьому тяжкість судом в підгрупі із застосуванням НІПУ на тлі введення наночастинок була достовірно меншою у порівнянні до підгруп, як з окремим застосуванням наночастинок, так і з окремими застосуванням НІПУ (Табл. 1). Також на тлі сумісного застосування досліджуваних чинників генералізовані судом спостерігали у одного щура із восьми, в той час як в групі контролю подібна тяжкість судом (4-5 балів) реєструвалась у більшості тварин (5 із 7) ($z=1.795$, $P=0,073$).

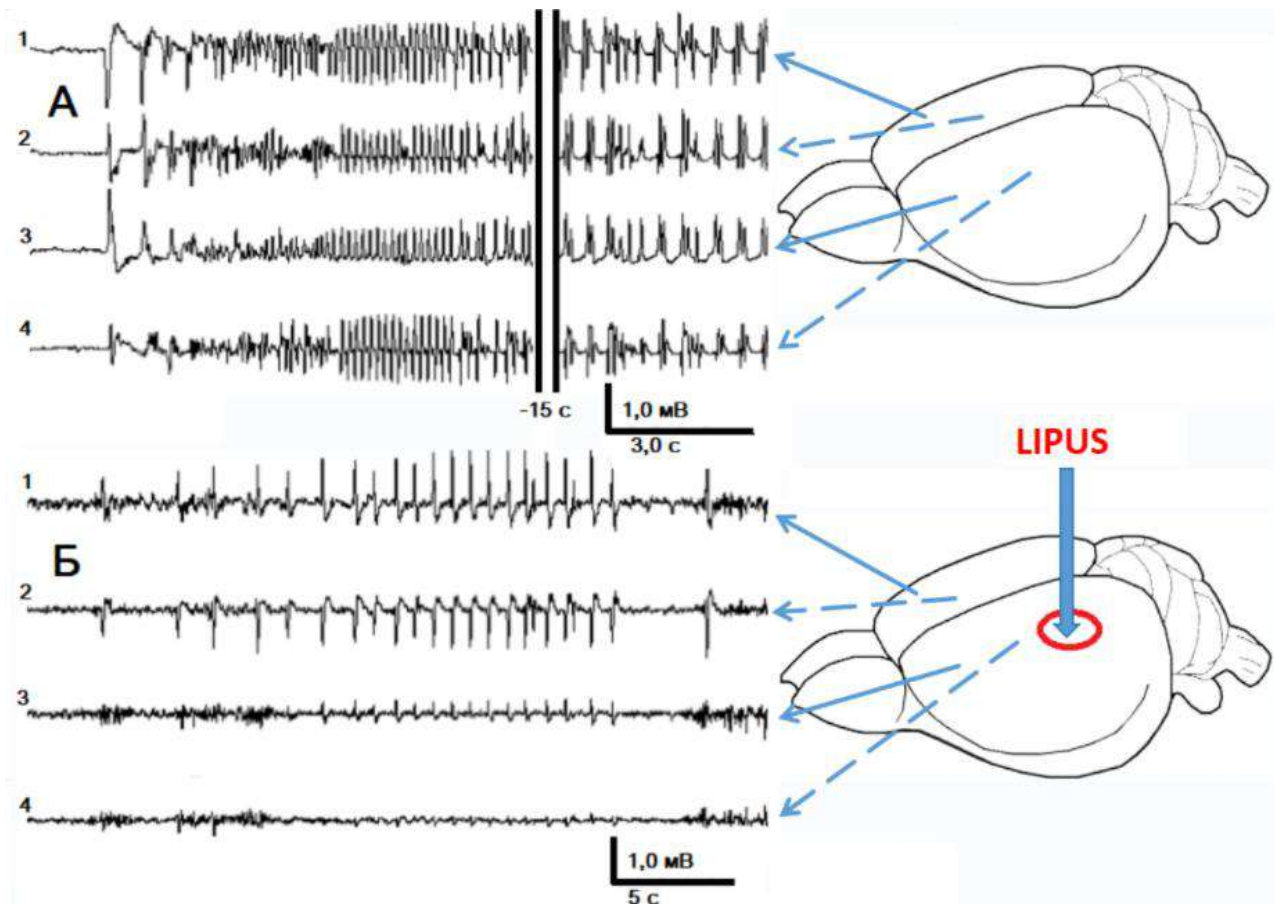


Рис.1. Вплив КНЧ навантажених ГАМК на електрографічні прояви епілептичної активності, викликані ПТЗ у кіндлінгових щурів за умови локального застосування НІПУ (LIPUS).

Позначки: А - 3,5 хв з моменту припинення хибного впливу LIPUS (10,0 хв) на тлі застосування наночастинок без навантаження ГАМК - через 17,5 хв з моменту застосування ПТЗ (35,0 мг/кг, в/очер) (контроль);

Б - 3,5 хв з моменту припинення впливу LIPUS на ліву півкулю в проекції на структури гіпокампу та через 25,0 хв з моменту застосування ПТЗ (35,0 мг/кг, в/очер).

1- та 2 - фронтальні відділи кори головного мозку правої та лівої півкуль відповідно - позначені суцільними стрілочками; 3 та 4 - вентральний гіпокамп правої та лівої півкуль відповідно - позначені преривчастими стрілочками.

Демонстративними були результати введення КНЧ навантажених ГАМК на електрографічні прояви, викликані застосуванням ПТЗ (35,0 мг/кг, в/очер) на тлі локального впливу на ліву півкулю головного мозку (Рис. 1). Проведені спостереження засвідчили, що за подібних умов в півкулі, на яку впливали НПУ спостерігалось виникнення незначних за амплітудою розрядів - 200-300 мкВ в корі головного мозку та гіпокампі (Рис. 1, Б, зони 3 та 4), в той час як в протилежній півкулі, на яку не здійснювали вплив НПУ у відповідних структурах реєстрували розряди значної амплітуди (1,8-2,0 мВ) (Рис. 1, Б, зони 1 та 2).

Тривалість іктальних потенціалів, однак, була меншою (10- 30 с) порівняно до контролю (від 25с до 1,5 хв) (Рис. 1, А).

Таким чином, отримані результати засвідчили, що однократний неінвазивний транскраніальний вплив НПУ супроводжувався тенденцією до зниження поведінкових судомних проявів у щурів із хронічним епілептичним синдромом, викликаним методом ПТЗ-індукованого кіндлінгу. Однак, виразність ефекту, так само як і вплив самостійного застосування КНЧ не досягав статистично достовірного рівня виразності.

Однак, аналогічне застосування НПУ на тлі попереднього введення КНЧ супроводжувався як попередженням генералізованих судом виразністю 4-5 балів, так і загальним зменшенням тяжкості судомних проявів. Локальний характер зростання вивільнення ГАМК під впливом КНЧ підтверджений відмінностями реєстрації електрографічних проявів судом, коли в зоні застосування НПУ спостерігалось попередження розвитку іктальних потенціалів, в той час як в протилежній півкулі реєструвалась виразна епілептиформна активність.

Попередження генералізованих клоніко-тонічних нападів за умови застосування НПУ свідчить щодо відновлення механізмів припинення розповсюдження епілептогенного збудження по нейрональним мережам, які мають критичне значення до залучення мотонейронів спинного мозку та виникнення власне неконтрольованих м'язових скорочень. Такими критичними структурами за умов моделювання ПТЗ-кіндлінгу виступають ретикулярна частина чорної речовини середнього мозку [5], а також структури таламусу, зокрема ретикулярне ядро, а також специфічні ділянки лімбічних структур, зокрема структури вентрального гіпокампу, які знаходились в проекції розповсюдженні механічних акустичних хвиль [9].

Можливо припустити, що вплив НППУ є ефективним не тільки щодо збудження механорецепторів нервової тканини, але й щодо вивільнення молекул за відсутності ковалентних зв'язків з транспортних форм карбонових нанотрубок. При цьому окремо слід зазначити, що НППУ може здійснювати коригуючий вплив шляхом попередження запального процесу в нервовій тканині, який є важливим елементом патогенезу хронічної епілепсії при ПТЗ-індукованому кіндлінгу [7]. Однак цей механізм може мати виразне значення при більш тривалих сеансах впливу НППУ і має перспективу розглядатися як альтернативний метод контролю збудливості структур головного мозку.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі:

1. Короткотривалий однократний вплив НППУ на структури головного мозку лівої півкулі, а також окреме застосування КНЧ навантажених ГАМК не викликають пригнічення ПТЗ-індукованих судом.

2. Сумісне застосування КНЧ навантажених ГАМК та НППУ викликає подовження латентного періоду виникнення та пригнічує як поведінкові, так і електрографічні прояви судомної активності у щурів із ПТЗ-кіндлінгом.

3. Застосування НППУ забезпечує локальне вивільнення ГАМК та розвиток виразного протисудомного ефекту.

Отримані результати розкривають широкі можливості для подальшого вивчення системних механізмів епілептогенезу. Враховуючи виявлену ефективність НППУ у корекції рухових порушень, перспективним є дослідження його комбінованої дії з метаболічно активними препаратами. Подальші розвідки можуть бути спрямовані на оцінку синергічного ефекту НППУ та модуляторів шляхів mTOR і PPAR-γ (наприклад, рапаміцин та піоглітазон) щодо корекції не лише рефлексорних, а й системних метаболічних ускладнень (інсулінорезистентність, гіперглікемія) та тканинних ушкоджень міокарда і печінки при хронічній епілепсії. Також перспективним є вивчення ефективності різних дозувань КНЧ та варіацій фізичних параметрів НППУ для оптимізації локальної доставки препаратів.

Література

1. Годлевський Л. С., Марченко С. В., Первак М. П., Пошивак О. Б., Єгоренко О. С. Система забезпечення локальної дії фармацевтичного засобу : пат. 153166 Україна : МПК А61К 9/00. № а202201810 ; заявл. 30.05.2022 ; опубл. 14.06.2023, Бюл. № 24.

2. Годлевський Л. С., Марченко С. В., Пошивак О. Б., Первак М. П., Єгоренко О. С. Система забезпечення локальної протекції від сторонніх небажаних ефектів дії фармацевтичного засобу : пат. 154934 Україна : МПК А61К 9/00. № u202302987 ; заявл. 20.06.2023 ; опубл. 03.01.2024, Бюл. № 1.

3. Bubrick E. J., McDannold N. J., White P. J. Low Intensity Focused Ultrasound for Epilepsy - A New Approach to Neuromodulation. *Epilepsy Curr.* 2022. Vol. 22, No. 3. P. 156–160. DOI: <https://doi.org/10.1177/15357597221086111>

4. Canney M., Bouchoux G., Carpentier A., De Rossi P. Repeated blood–brain barrier opening using low-intensity pulsed ultrasound mitigates amyloid pathology. *Ultrasound in Medicine & Biology*. 2026. Vol. 52, No. 2. P. 418–430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2025.10.008>
5. Gale K. Subcortical Structures and Pathways Involved in Convulsive Seizure Generation. *Journal of Clinical Neurophysiology*. 1992. Vol. 9, No. 2. P. 264–277. DOI: <https://doi.org/10.1097/00004691-199204010-00007>
6. Kajita Y., Fukuda Y., Kawamatsu R., Oyanagi T., Mushiake H. Pentylene-tetrazole kindling induces dynamic changes in GAD65 expression in hippocampal somatostatin interneurons. *Pharmacol Biochem Behav*. 2024. Vol. 239. Art. 173755. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pbb.2024.173755>
7. Ling L., Wei T., He L. [et al.]. Low-intensity pulsed ultrasound activates ERK1/2 and PI3K-Akt signalling pathways and promotes the proliferation of human amnion-derived mesenchymal stem cells. *Cell Prolif*. 2017. Vol. 50, No. 6. Art. e12383. DOI: <https://doi.org/10.1111/cpr.12383>
8. Liu S., Zhou M., Li J. [et al.]. LIPUS inhibited the expression of inflammatory factors and promoted the osteogenic differentiation capacity of hPDLCS by inhibiting the NF-κB signaling pathway. *J. Periodontal. Res*. 2020. Vol. 55, No. 1. P. 125–140. DOI: <https://doi.org/10.1111/jre.12696>
9. Löscher W. Animal Models of Seizures and Epilepsy: Past, Present, and Future Role for the Discovery of Antiseizure Drugs. *Neurochem Res*. 2017. Vol. 42, No. 7. P. 1873–1888. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11064-017-2222-z>
10. Min J. O., Kim S. Y., Shin U. S., Yoon B. E. Multi-walled carbon nanotubes change morpho-functional and GABA characteristics of mouse cortical astrocytes. *J Nanobiotechnol*. 2015. Vol. 13. Art. 92. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12951-015-0152-y>
11. Qin P. P., Jin M., Xia A. W. [et al.]. The effectiveness and safety of low-intensity transcranial ultrasound stimulation: A systematic review of human and animal studies. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2024. Vol. 156. Art. 105501. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2023.105501>
12. Whitney N., Lamb A., Louw T., Subramanian A. Integrin-Mediated Mechanotransduction Pathway of Low-Intensity Continuous Ultrasound in Human Chondrocytes. *Ultrasound in Medicine and Biology*. 2012. Vol. 38. P. 1734–1743. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2012.06.002>
13. Yoo S. S., Kim H., Min B. K. [et al.]. Transcranial focused ultrasound to the thalamus alters anesthesia time in rats. *Neuroreport*. 2011. Vol. 22, No. 15. P. 783–787. DOI: <https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e32834b2957>
14. Zhou Y., Fang Y., Ramasamy R. P. Non-Covalent Functionalization of Carbon Nanotubes for Electrochemical Biosensor Development. *Sensors (Basel)*. 2019. Vol. 19, No. 2. Art. 392. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19020392>

References

1. Hodlevskyi LS, Marchenko SV, Pervak MP, Poshyvak OB, Yehorenko OS, inventors; Odesa National Medical University, assignee. Systema zabezpechennia lokalnoi dii farmatsevychnoho zasobu [System for ensuring the local action of a pharmaceutical product]. Patent of Ukraine No. 153166. 2023 Jun 14. Ukrainian.
2. Hodlevskyi LS, Marchenko SV, Poshyvak OB, Pervak MP, Yehorenko OS, inventors; Odesa National Medical University, assignee. Systema zabezpechennia lokalnoi protektsii vid storonnikh nebazhanykh effektiv dii farmatsevychnoho zasobu [System for providing local protection against extraneous undesirable effects of a pharmaceutical product]. Patent of Ukraine No. 154934. 2024 Jan 03. Ukrainian.

3. Bubrick EJ, McDannold NJ, White PJ. Low Intensity Focused Ultrasound for Epilepsy - A New Approach to Neuromodulation. *Epilepsy Curr.* 2022;22(3):156-160. doi: 10.1177/15357597221086111.
4. Canney M, Bouchoux G, Carpentier A, De Rossi P. Repeated blood–brain barrier opening using low-intensity pulsed ultrasound mitigates amyloid pathology. *Ultrasound in Medicine & Biology.* 2026;52(2):418-430. doi: 10.1016/j.ultrasmedbio.2025.10.008.
5. Gale K. Subcortical Structures and Pathways Involved in Convulsive Seizure Generation. *Journal of Clinical Neurophysiology.* 1992;9(2):264-277. doi: 10.1097/00004691-199204010-00007.
6. Kajita Y, Fukuda Y, Kawamatsu R, Oyanagi T, Mushiake H. Pentylentetrazole kindling induces dynamic changes in GAD65 expression in hippocampal somatostatin interneurons. *Pharmacol Biochem Behav.* 2024;239:173755. doi: 10.1016/j.pbb.2024.173755.
7. Ling L, Wei T, He L, Wang Y, Wang Y, Feng X, et al. Low-intensity pulsed ultrasound activates ERK1/2 and PI3K-Akt signalling pathways and promotes the proliferation of human amnion-derived mesenchymal stem cells. *Cell Prolif.* 2017;50(6):e12383. doi: 10.1111/cpr.12383.
8. Liu S, Zhou M, Li J, Hu B, Jiang D, Huang H, et al. LIPUS inhibited the expression of inflammatory factors and promoted the osteogenic differentiation capacity of hPDLCs by inhibiting the NF- κ B signaling pathway. *J Periodontal Res.* 2020;55(1):125-140. doi: 10.1111/jre.12696.
9. Löscher W. Animal Models of Seizures and Epilepsy: Past, Present, and Future Role for the Discovery of Antiseizure Drugs. *Neurochem Res.* 2017;42(7):1873-1888. doi: 10.1007/s11064-017-2222-z.
10. Min JO, Kim SY, Shin US, Yoon BE. Multi-walled carbon nanotubes change morpho-functional and GABA characteristics of mouse cortical astrocytes. *J Nanobiotechnol.* 2015;13:92. doi: 10.1186/s12951-015-0152-y.
11. Qin PP, Jin M, Xia AW, Li AS, Lin TT, Liu Y, et al. The effectiveness and safety of low-intensity transcranial ultrasound stimulation: A systematic review of human and animal studies. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews.* 2024;156:105501. doi: 10.1016/j.neubiorev.2023.105501.
12. Whitney N, Lamb A, Louw T, Subramanian A. Integrin-Mediated Mechanotransduction Pathway of Low-Intensity Continuous Ultrasound in Human Chondrocytes. *Ultrasound in Medicine and Biology.* 2012;38:1734-1743. doi: 10.1016/j.ultrasmedbio.2012.06.002.
13. Yoo SS, Kim H, Min BK, et al. Transcranial focused ultrasound to the thalamus alters anesthesia time in rats. *Neuroreport.* 2011;22(15):783-787. doi: 10.1097/WNR.0b013e32834b2957.
14. Zhou Y, Fang Y, Ramasamy RP. Non-Covalent Functionalization of Carbon Nanotubes for Electrochemical Biosensor Development. *Sensors (Basel).* 2019;19(2):392. doi: 10.3390/s19020392.

Дата першого надходження статті до видання: 04.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.04.2026