

©І. Б. Чень¹ <https://orcid.org/0000-0001-8208-2000>
©О. І. Боднар¹ <https://orcid.org/0000-0002-8416-5464>
©Л. О. Вакуленко¹ <https://orcid.org/0000-0002-4723-3747>
©С. З. Храбра¹ <https://orcid.org/0000-0001-8944-6030>
©Г. О. Стельмах² <https://orcid.org/0000-0003-2992-3274>
©С. М. Федоров³ <http://orcid.org/0000-0001-5255-0723>

¹Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка,
Тернопіль, Україна

²Тернопільський національний медичний університет імені І. Я. Горбачевського МОЗ України,
Тернопіль, Україна

³Національний університет охорони здоров'я України імені П. Л. Шупика МОЗ України, Київ, Україна

СУЧАСНЕ БАЧЕННЯ ТА ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ МЕХАНІЗМУ НЕЙРОПЛАСТИЧНОСТІ ПРИ ПРОВЕДЕННІ РЕАБІЛІТАЦІЇ

РЕЗЮМЕ. Нейропластичність – це ключовий механізм відновлення функцій після уражень нервової системи. Сучасна реабілітація базується на принципі, що нервова система здатна змінюватися й адаптуватися – і це можна стимулювати спеціальними втручаннями.

Мета – узагальнення сучасних уявлень про біологічні основи та механізми нейропластичності, а також висвітлення їхньої ролі у відновленні нервової системи під час реабілітації.

Матеріал і методи. Застосовано методи системного аналізу та узагальнення даних з літератури, зокрема з бази PubMed. Охоплено біологічні основи, клітинні й нейрофізіологічні механізми нейропластичності, а також принципи її використання в реабілітації.

Результати. Дослідження того, як відбувається синаптична пластичність і як вона модифікується протягом певних часових вікон розвитку, дасть ключову інформацію про те, як розвивається мозок. Більше того, краще розуміння того, як відбуваються синаптичні модифікації під час навчання й запам'ятовування та/або розвитку, може допомогти сформулювати та підвищити ефективність сучасних протоколів на ранніх етапах навчання.

Реабілітаційні втручання (рухова активність, тренування, стимуляція) активують синаптичну пластичність, нейрогенез, регенерацію аксонів, виділення нейротрофічних факторів. Ці зміни підвищують адаптивність та компенсаторні можливості нервової системи. Сучасний підхід підкреслює важливість індивідуальної реабілітаційної стратегії, що максимально стимулює нейропластичність конкретного пацієнта.

Дослідження показали, що саму нейрореабілітацію можна розглядати як частину нейропластичності або як засіб її посилення, встановлюючи таким чином симбіотичний зв'язок між ними.

Висновки. Сучасний погляд на проблему нейропластичності – це не просто теоретична основа, а головний інструмент, який потрібно активно використовувати для відновлення пацієнта. Реабілітація має бути «підлаштована» під ці механізми, щоб дати максимальний результат.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: нейропластичність; нервова система; реабілітація; порушення нейророзвитку; нейрофізіологічні механізми.

Вступ. Сучасна реабілітація базується на принципі, що нервова система здатна змінюватися й адаптуватися – і це можна стимулювати спеціальними втручаннями.

Нейропластичність – це ключовий механізм відновлення функцій після уражень нервової системи. Оскільки мозок виявився певною мірою гнучким, пластичним, дослідники в усьому світі намагаються зрозуміти його основи, щоб краще зрозуміти сам мозок, робити прогнози, розібратися в нейробіології захворювань мозку та, нарешті, запропонувати сучасні методи лікування.

Як концепція, нейропластичність означає здатність нервової системи реорганізовувати

свою структуру та функціонування у відповідь на певні подразники, внутрішні чи зовнішні [1].

Нейропластичність зараз добре визнана як фундаментальна та довічна властивість мозку. Хоча частково скомпрометована, порівняно з раннім нейророзвитком, ремоделювання мозку дорослих все ще є важливим і досить необхідним для поведінкових коригувань на основі навчання/досвіду та внутрішнього середовища [2].

Мета – узагальнення сучасних уявлень про біологічні основи та механізми нейропластичності, а також висвітлення їхньої ролі у відновленні нервової системи під час реабілітації.

Матеріал і методи дослідження. Використано методи системного аналізу та узагальнення

наукової інформації. Було проведено пошук та аналіз сучасної літератури з тематики нейропластичності, її біологічних основ, клітинних і нейрофізіологічних механізмів, а також питань регенерації та функціональної реорганізації нервової системи. Пошук джерел здійснювався в базі даних PubMed. До аналізу включені оригінальні дослідження, оглядові статті, а також публікації, присвячені застосуванню принципів нейропластичності в реабілітаційній практиці.

Результати й обговорення. Люди народжуються з десятками мільярдів клітин мозку, і один нейрон може зв'язуватися з 15 000 іншими клітинами, більше того, мозок 3-річної дитини має майже 1000 трильйонів синапсів. Незріла нервова система має принципово надлишкову нейронну мережу, про що свідчить щільність кортикальних дендритних шипиків, яка в дитинстві перевищувала в півтора-три рази щільність у мозку дорослої людини [3].

Протягом раннього розвитку дозрівання нервової системи має високодинамічний процес нейронального ремоделювання [4].

Нейропластичність – це проста концепція, але її механізм надзвичайно складний, включає кілька основних процесів: **синаптичну пластичність**, формування нових синапсів, регенерацію аксонів та дендритів, **мієлінізацію**, рекомбінацію нейронних мереж [5].

Синаптична пластичність є невід'ємною частиною розвитку та функціонування мозку, вона також є важливою для процесів навчання та пам'яті. Крім того, часові вікна для пластичності, що існують під час розвитку, формують зв'язки в мозку та його активність [6].

Таким чином, дослідження того, як відбувається синаптична пластичність і як вона модифікується протягом певних часових вікон розвитку, дасть ключову інформацію про те, як розвивається мозок. Більше того, краще розуміння того, як відбуваються синаптичні модифікації під час навчання та запам'ятовування, та/або розвитку, може допомогти сформувати та підвищити ефективність сучасних протоколів на ранніх етапах навчання.

З іншого боку, пластичність – це також явище, яке сприяє відновленню мозку після пошкоджень, спричинених такими подіями, як інсульт або травма. Здатність маніпулювати певними нейрональними шляхами та синапсами має важливі наслідки для терапевтичних та клінічних утручань, які покращать наше здоров'я. Перспективні методи лікування, такі як глибока стимуляція мозку, неінвазивна стимуляція мозку, нейрофармакологія, фізичні вправи, когнітивне тренування або зворотний зв'язок з використанням

функціонального магнітного резонансу в реальному часі [7], базуються на сучасному розумінні пластичності мозку та є предметом інтенсивних досліджень різних патологій. Краще розуміння механізмів, що регулюють нейропластичність після пошкодження мозку або ураження нервів, допоможе покращити якість життя пацієнтів, зрештою заощаджуючи кошти національних систем охорони здоров'я в усьому світі.

Реабілітаційні втручання (рухова активність, тренування, стимуляція) активують синаптичну пластичність, нейрогенез, регенерацію аксонів, виділення нейротрофічних факторів. Ці зміни підвищують адаптивність та компенсаторні можливості нервової системи.

Завдяки нейропластичності виникають нові нейронні зв'язки, які частково заміщують або компенсують пошкоджені. Наприклад, у пацієнтів після інсульту інші ділянки кори можуть перебирати функції втрачених.

Сучасний підхід підкреслює важливість індивідуальної реабілітаційної стратегії, що максимально стимулює нейропластичність конкретно-го пацієнта.

У дітей із затримками розвитку або церебральним паралічем знання про нейропластичність дозволяють скоригувати порушення нейронних мереж та сформувати нові компенсаторні стратегії. **Потенціал нейропластичності у дітей вищий, ніж у дорослих**, що є надзвичайно важливим фактором у процесі реабілітації. Нейропластичність, або здатність мозку змінювати свою структуру та функції у відповідь на досвід, навчання чи пошкодження, є найбільш вираженою в ранньому віці. Це означає, що нервова система дитини значно легше адаптується, компенсує порушення та формує нові нейронні зв'язки.

Дослідження показали, що саму нейрореабілітацію можна розглядати як частину нейропластичності або як засіб її посилення, встановлюючи таким чином симбіотичний зв'язок між ними [8]. Важливо під час планування протоколу реабілітації враховувати згадані вище основи нейропластичності для її подальшого посилення. Тренувальні стратегії на основі нейропластичності формують новий клас терапевтичних інструментів, що працюють на органічному рівні неврологічних та психіатричних захворювань. Вони спрямовані на широкі неврологічні порушення та неврологічні спотворення, спричинені захворюваннями, їхні результати можуть забезпечити стійкі зміни в мозку цих пацієнтів, тим самим покращуючи їхні функції та спосіб життя [9].

Оскільки мозок виявився певною мірою гнучким, пластичним, дослідники в усьому світі намагаються зрозуміти його основи, щоб краще зрозу-

міти сам мозок, робити прогнози, розібратися в нейробіології захворювань мозку та, нарешті, запропонувати сучасні методи лікування.

Висновки. Сучасний погляд на проблему нейропластичності – це не просто теоретична основа, а головний інструмент, який потрібно активно використовувати для відновлення пацієнта. Реабілітація має бути «підлаштована» під ці механізми, щоб дати максимальний результат.

Перспективи подальших досліджень. Дослідження взаємозв'язку між нейропластичністю та біоелектричними маркерами функціонального стану нервової системи для оптимізації протоколів реабілітаційного втручання.

Джерела фінансування. Власні кошти авторів.

Внесок авторів:

І. Б. Чень – розробка ідеї та дизайну дослідження, формування концепції дослідження, проведення огляду літератури та написання тексту;

О. І. Боднар – формування концепції дослідження та обговорення результатів;

Л. О. Вакуленко – проведення огляду літератури та написання тексту, формування концепції дослідження;

С. З. Храбра – виконання аналізу та обговорення результатів дослідження.

Г. О. Стельмах – проведення огляду літератури та написання тексту;

С. М. Федоров – виконання аналізу та обговорення результатів.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mateos-Aparicio P., Rodríguez-Moreno A. The Impact of Studying Brain Plasticity. *Frontiers in cellular neuroscience*. 2019. Vol. 13. P. 66. DOI: 10.3389/fncel.2019.00066.
2. May A. Experience-dependent structural plasticity in the adult human brain. *Trends in cognitive sciences*. 2011. Vol. 15, No. 10. P. 475–482. DOI: 10.1016/j.tics.2011.08.002.
3. Fauth M., Tetzlaff C. Opposing Effects of Neuronal Activity on Structural Plasticity. *Frontiers in neuroanatomy*. 2016. Vol. 10. P. 75. DOI: 10.3389/fnana.2016.00075.
4. Kirk R. W. et al. Multiplexed CRISPRi Reveals a Transcriptional Switch Between KLF Activators and Repressors in the Maturing Neocortex. *bioRxiv: the preprint server for biology*. 2025. 2025.02.07.636951. DOI: 10.1101/2025.02.07.636951.
5. Diniz C. R. A. F., Crestani A. P. The times they are a-changin': a proposal on how brain flexibility goes beyond the obvious to include the concepts of "upward" and

"downward" to neuroplasticity. *Molecular psychiatry*. 2023. Vol. 28, No. 3. P. 977–992. DOI: 10.1038/s41380-022-01931-x.

6. Pérez-Rodríguez M. et al. Adenosine Receptor-Mediated Developmental Loss of Spike Timing-Dependent Depression in the Hippocampus. *Cerebral cortex (New York, N.Y. : 1991)*. 2019. Vol. 29, No. 8. P. 3266–3281. DOI: 10.1093/cercor/bhy194.

7. Cramer S. C. et al. Harnessing neuroplasticity for clinical applications. *Brain : a journal of neurology*. 2011. Vol. 134, Pt 6. P. 1591–1609. DOI: 10.1093/brain/awr039.

8. Khan F. et al. Neurorehabilitation: applied neuroplasticity. *Journal of neurology*. 2017. Vol. 264, No. 3. P. 603–615. DOI: 10.1007/s00415-016-8307-9.

9. Chatterjee D., Hegde S., Thaut M. Neural plasticity: The substratum of music-based interventions in neurorehabilitation. *NeuroRehabilitation*. 2021. Vol. 48, No. 2. P. 155–166. DOI: 10.3233/NRE-208011.

REFERENCES

1. Mateos-Aparicio P, Rodríguez-Moreno A. The Impact of Studying Brain Plasticity. *Frontiers in cellular neuroscience*. 2019;13:66. DOI: 10.3389/fncel.2019.00066
2. May A. Experience-dependent structural plasticity in the adult human brain. *Trends in cognitive sciences*. 2011;15(10):475–482. DOI: 10.1016/j.tics.2011.08.002
3. Fauth M, Tetzlaff C. Opposing Effects of Neuronal Activity on Structural Plasticity. *Frontiers in neuroanatomy*. 2016;10:75. DOI: 10.3389/fnana.2016.00075
4. Kirk RW, Sun L, Xiao R, Clark EA, Nelson S. Multiplexed CRISPRi Reveals a Transcriptional Switch Between KLF Activators and Repressors in the Maturing Neocortex. *bioRxiv : the preprint server for biology*. 2025;2025.02.07.636951. DOI: 10.1101/2025.02.07.636951

5. Diniz CRAF, Crestani AP. The times they are a-changin': a proposal on how brain flexibility goes beyond the obvious to include the concepts of "upward" and "downward" to neuroplasticity. *Molecular psychiatry*. 2023;28(3):977–992. DOI: 10.1038/s41380-022-01931-x

6. Pérez-Rodríguez M, Arroyo-García LE, Prius-Mengual J, Andrade-Talavera Y, Armengol JA, Pérez-Villegas EM, Duque-Feria P, Flores G, & Rodríguez-Moreno A. Adenosine Receptor-Mediated Developmental Loss of Spike Timing-Dependent Depression in the Hippocampus. *Cerebral cortex (New York, N.Y.:1991)*. 2019;29(8):3266–3281. DOI: 10.1093/cercor/bhy194

7. Cramer SC, Sur M, Dobkin BH, O'Brien C, Sanger TD, Trojanowski JQ, Rumsey JM, Hicks R, Cameron J, Chen D,

Chen WG, Cohen LG, deCharms C, Duffy CJ, Eden GF, Fetz EE, Filart R, Freund M, Grant SJ, Haber S, ... Vinogradov S. Harnessing neuroplasticity for clinical applications. *Brain: a journal of neurology*. 2011;134(Pt 6):1591–1609. DOI: 10.1093/brain/awr039

8. Khan F, Amatya B, Galea MP, Gonzenbach R, & Kesselring J. Neurorehabilitation: applied neuroplasticity.

Journal of neurology. 2017;264(3): 603–615. DOI: 10.1007/s00415-016-8307-9

9. Chatterjee D, Hegde S, & Thaut M. Neural plasticity: The substratum of music-based interventions in neurorehabilitation. *NeuroRehabilitation*. 2021;48(2): 155–166. DOI: 10.3233/NRE-208011

I. B. Chen¹, O. I. Bodnar¹, L. O. Vakulenko¹, S. Z. Khrabra¹, H. O. Stelmakh², S. M. Fedorov³

¹*Volodymyr Hnatiuk Ternopil National Pedagogical University, Ternopil, Ukraine*

²*Ivan Horbachevsky Ternopil National Medical University of the Ministry of Health of Ukraine, Ternopil, Ukraine*

³*Shupyk National University of Health Care of the Ministry of Health of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

MODERN VISION AND PRACTICAL ASPECTS OF THE NEUROPLASTICITY MECHANISM IN REHABILITATION

SUMMARY. Neuroplasticity is a key mechanism for restoring function after nervous system damage. Modern rehabilitation is based on the principle that the nervous system is able to change and adapt - and this can be stimulated by special interventions.

The aim – to summarize the current understanding of the biological basis and mechanisms of neuroplasticity, as well as to highlight their role in the recovery of the nervous system during rehabilitation.

Material and Methods. The methods of systematic analysis and generalization of data from the literature, in particular from the PubMed database, were used. The biological bases, cellular and neurophysiological mechanisms of neuroplasticity, as well as the principles of its use in rehabilitation are covered.

Results. The study of how synaptic plasticity occurs and how it is modified during certain time windows of development will provide key information about how the brain develops. Furthermore, a better understanding of how synaptic modifications occur during learning and memory and/or development may help to shape and improve the effectiveness of current protocols in the early stages of learning.

Rehabilitation interventions (motor activity, training, stimulation) activate synaptic plasticity, neurogenesis, axon regeneration, and the release of neurotrophic factors. These changes increase the adaptability and compensatory capacity of the nervous system. The modern approach emphasizes the importance of an individualized rehabilitation strategy that maximizes the neuroplasticity of a particular patient.

Studies have shown that neurorehabilitation itself can be considered as a part of neuroplasticity or as a means of enhancing it, thus establishing a symbiotic relationship between them.

Conclusions. The modern view of the problem of neuroplasticity is not just a theoretical basis, but the main tool that should be actively used to restore the patient. Rehabilitation should be “adjusted” to these mechanisms in order to maximize the result.

KEY WORDS: neuroplasticity; nervous system; rehabilitation; neurodevelopmental disorders; neurophysiological mechanisms.

Отримано 29.05.2025

Електронна адреса для листування: irynachen35@gmail.com