МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Львівський національний університет імені Івана Франка
Біологічний факультет
Кафедра генетики та біотехнології

ЗАТВЕРДЖЕНО
на засіданні кафедри генетики та біотехнології
протокол № 3 від 07. 02 2026 р.

Завідувач кафедри _____
проф. Віктор ФЕДОРЕНКО

Силабус з навчальної дисципліни

«Редагування геномів і медицина майбутнього»

що викладається в межах ОПП «Біотехнології та біоінженерія»
другого (магістерського) рівня вищої освіти для здобувачів
за спеціальністю G21 – Біотехнології та біоінженерія

Львів 2026

Назва курсу	Редагування геномів і медицина майбутнього
Адреса викладання курсу	вул. Грушевського 4, 79005 Львів
Факультет та кафедра, за якою закріплена дисципліна	біологічний факультет, кафедра генетики і біотехнології
Галузь знань, шифр та назва спеціальності	Е Природничі науки, математика та статистика, Е1 Біологія та біохімія
Викладачі курсу	Доцент кафедри генетики і біотехнології, к.б.н. Наталія ГОЛУБ
Контактна інформація викладачів	nataliia.holub@lnu.edu.ua
Консультації по курсу відбуваються	Консультації в день проведення лекцій та практичних занять (за попередньою домовленістю). Також можливі он-лайн консультації на платформі ZOOM.
Сторінка курсу	
Інформація про курс	Дисципліна «Редагування геномів і медицина майбутнього» є вибірковою дисципліною для магістрів за спеціальністю Е1 Біологія та біохімія, яка викладається в ІІ семестрі в обсязі 4 кредити (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS), з яких 32 год. лекцій, 16 год. практичних занять та 72 години самостійної роботи. Форма контролю – залік.
Коротка анотація курсу	Людство вступило в безпрецендентну еру швидких технологічних змін, де розробки в таких сферах як інформатика, штучний інтелект (ШІ), генна інженерія, нейрогенетика, робототехніка керуватимуть майбутнім у медицині. З'явилися перші компанії, які об'єднали можливості штучного інтелекту і біотехнології. Ці компанії націлені на розробку ліків з використанням новітніх ідей обох цих галузей, створюючи новітню базу для фармацевтичної промисловості. Об'єднання ШІ та біотехнології у нову науку матиме глибокий вплив на розвиток діагностики, медицини та нефармацевтичного втручання у лікуванні хронічних захворювань і ментального здоров'я. Дисципліна **«Редагування геномів і медицина майбутнього присвячена** вивченню сучасних методів

	редагування геномів, їхньому застосуванню в медичній практиці та перспективним напрямкам розвитку медицини майбутнього. Студенти отримають знання про принципи роботи таких ключових технологій, як CRISPR-Cas, TALEN та ZFN, їхню ефективність, безпеку та етичні аспекти. Особлива увага приділяється інтеграції цих технологій з штучним інтелектом для створення персоналізованих та високоефективних терапевтичних стратегій.
Мета та цілі курсу	Метою викладання навчальної дисципліни “Редагування геномів та медицина майбутнього” є формування у магістрів-біологів глибоких теоретичних знань та практичних навичок у галузі геномного редагування та його застосування для лікування захворювань, а також розуміння ролі штучного інтелекту у біотехнологічних дослідженнях, фармацевтиці, діагностиці захворювань, редагуванні геномів.
Література для вивчення дисципліни	**Основна література:** 1. Методи машинного навчання при проєктуванні автоматизованих систем керування [Електронний ресурс] : навч. посіб. для аспірантів спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» / Укладач: Т. Г. Баган; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані (1 файл: 313 кБайт). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 28 с. 2. Кононова К. Ю. Машинне навчання: методи та моделі: підручник для бакалаврів, магістрів та докторів філософії спеціальності 051 «Економіка». Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2020. 301 с. 3. Штовба С.Д., Козачко О.М. Machine learning: стартовий курс : електронний навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2020. 81 с. 4. Adami C. The Evolution of Biological Information. How evolution creates complexity, from viruses to brains. – Princeton University Press, 2024 - 585 p.

5. Aljabali A., Tanani M., Tambuwala M. Principles of CRISPR-Cas9 technology: Advancements in genome editing and emerging trends in drug delivery // Journal of Drug Delivery Science and Technology. -2024. – Vol. 92. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2024.105338

6. Coley C.W., Barzilay R., Jaakkola T.S., Green W.H., Jensen K.F. Prediction of Organic Reaction Outcomes Using Machine Learning // ACS Cent. Sci. – 2017. - May 24;3(5). – P. 434–443.

7. Ethical Issues in AI for Bioinformatics and Chemoinformatics / Ed. by Pathak Y., Saikia S., Pathak S., Patel J., Prajapati j. - CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2024. – 224 p.

8. Folding@home [Internet]. Available from: https://foldingathome .org/

9. Frenzel A., Schirrmann T., Hust M. Phage display-derived human antibodies in clinical development and therapy // MAbs. -2016. – Vol.14;8(7). – P.1177–1194.

10. Hilbush B. In Silico Dreams. How Artificial Intelligence and Biotechnology Will Create the Medicines of the Future. - Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2021. – 350 p.

11. Lowe D. AI and Drug Discovery: Attacking the Right Problems. In the Pipeline. 2021. Available from: https://blogs.sciencemag.org/pipeline/archives/2021/03/19/ai-and-drug-discovery-attacking-the-right-problems.

12. Narayanan H., Dingfelder F., Lorenzen N., Sokolov M., Arosio P. Machine Learning for Biologics: Opportunities for Protein Engineering, Developability, and Formulation // Trends Pharmacol. Sci. – 2021. - Mar;42(3). – P. 151–165.

13. Protein Data Bank [Internet]. Available from: https://www.rcsborg/3d-view/6VSB/1

14. Schwessinger R, Gosden M, Downes D, Brown RC, Oudelaar AM, Telenius J, et al. DeepC: predicting 3D genome folding using megabase-scale transfer learning // Nature Methods. – 2020. - Nov;17(11). -P. 1118–1124.

15. Senior AW, Evans R, Jumper J, Kirkpatrick J, Sifre L, Green T, et al. Improved protein structure prediction using potentials from deep learning // Nature. - 2020 --/ Jan;577(7792). – P. 706–710.

Додаткова література:

	1. Дудна Дж. Зламати ДНК. Редагування генома та контроль над еволюцією / пер. з англ. Литвиненко Г. /Дж. Дудна, С. Стернберг / - Київ: Наш формат, 2019. 291 с. 2. Останні наукові статті з журналів Nature, Science, Cell, New England Journal of Medicine, The Lancet, Molecular Therapy, Nature Biotechnology, CRISPR Journal, Nature Methods, Nucleic Acids Researches. Nature Medicine. 3. Holub N., Klepach H., Stasyk O., Stolyarchuk I., Kuzyk O., Los V., Stolyarchuk A. CdTe quantum dots–albumin bionanocomplex: genotoxic potential and bioimaging application in a Drosophila melanogaster model // Biophysical bulletin. 2026. Is. 55. P. 53─64. https://doi.org/10.26565/2075-3810-2026-55-05 4. Kuzyk O., Stolyarchuk A., Dan'kiv O., Stilyarchuk I., Klepach H., Holub N. Modeling bioconjugation of cadmium-contaning semiconductor quantum dots with proteins // Journal of Materials Research. Available from: https://link.springer.com/article/10.1557/s43578-026-01861-2 5. The AlphaFold Team. AlphaFold: a solution to a 50-year-old grand challenge in biology. 2020. Available from: https://deepmind.com/blog/article/alphafold-a-solution-to-a-50-year-old-grand-challenge-in-biology **Інформаційні ресурси** 1. https://genomebiology.biomedcentral.com/ 2. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov 3. https://www.frontiersin.org/journals/genome-editing 4. https://www.journals.elsevier.com/gene-and-genome-editing/ 5. https://home.liebertpub.com/publications/genetic-engineering-and-biotechnology-news 6. https://home.liebertpub.com/publications/the-crispr-journal 7. http://specials.kunsht.com.ua/machinelearning1 8. http://specials.kunsht.com.ua/machinelearning2 9. https://evergreens.com.ua/ru/articles/machine-learning-overview.html 10. https://uk.education-wiki.com/4127994-machine-learning-methods#menu-1 11. https://www.it.ua/knowledge-base/technology-innovation/machine-learning
Тривалість курсу	8 тижнів

Обсяг курсу	120 годин, з яких 48 години аудиторних занять, з них 32 години лекцій, 16 годин практичних занять та 72 години самостійної роботи
Очікувані результати навчання	Після завершення цього курсу студент буде: **знати:** • Молекулярні механізми, класифікацію, переваги та обмеження інструментів геномного редагування різних поколінь (ZFN, TALEN, CRISPR-Cas системи, а також Base та Prime Editors); • Фундаментальні відмінності між архітектурою класичних нейромереж, методами машинного навчання (Machine Learning) та глибинного навчання (Deep Learning), а також специфіку їх застосування в біології та медицині; • Принципи використання ШІ-платформ (зокрема, AlphaFold, DeepC тощо) для прогнозування 3D-структури білків, фолдингу геному, а також пошуку кореляцій між генетичними варіантами та фенотиповими проявами захворювань; • Методологію застосування алгоритмів ШІ для комп'ютерного дизайну ліків (*de novo*), віртуального скринінгу молекул (QSAR, QSPR, SAR аналізи) та прогнозування фармакокінетичних властивостей сполук; • Сучасні підходи терапії *in vivo* та *ex vivo* для лікування генетичних, онкологічних (зокрема CAR-T) та інфекційних захворювань, а також принципи створення РНК- та ДНК-вакцин; • Стратегії використання штучного інтелекту для розробки персоналізованих протоколів лікування на основі аналізу великих омікcних даних (OMICs) та фармакогеноміки; • Ключові біоетичні дилеми, законодавчі обмеження та регуляторні рамки щодо редагування зародкової лінії людини, ембріонів, концепції "покращення людини" (human enhancement) та використання ШІ як «чорної скриньки» в клінічній практиці; **вміти:** • Аналізувати та критично оцінювати наукову літературу в галузях геномного редагування, молекулярної медицини та біоінформатики, інтегруючи дані для вирішення дослідницьких завдань;

	• Обґрунтовувати вибір оптимальної системи геномного редагування (наприклад, CRISPR/Cas9, Base чи Prime Editors) та способу її доставки (*in vivo* чи *ex vivo*) залежно від типу мутації та цільової тканини; • Використовувати біоінформатичні інструменти та алгоритми ШІ для дизайну оптимальних гідів (gRNA) та мінімізації/прогнозування побічних (*off-target*) ефектів редагування; • Моделювати стратегії пошуку терапевтичних мішеней та віртуального скринінгу потенційних лікарських речовин із застосуванням хемоінформатичних підходів; • Вирішувати складні ситуативні задачі у сфері персоналізованої медицини, інтерпретуючи генетичні профілі пацієнтів для оптимізації схем лікування; • Оцінювати безпеку та довгострокові ризики терапевтичних втручань (включаючи хромосомні перебудови, імунні реакції пацієнта), розробляти схеми пост-терапевтичного моніторингу; • Вести фахову наукову дискусію та аргументувати власну позицію щодо біоетичних та соціальних аспектів застосування біотехнологій і ШІ в охороні здоров'я.
Ключові слова	Редагування геномів, штучний інтелект, нейромережа, CRISPR-cas система.
Формат курсу	Очний, дистанційний
	Проведення лекцій, семінарських занять та консультації для кращого розуміння тем
Теми	Наведено у табл.1
Підсумковий контроль, форма	залік
Пререквізити	Для вивчення курсу студенти потребують базових знань з генетики, вірусології, біотехнології, молекулярної біології, біоінформатики достатніх для сприйняття категоріального апарату.
Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу	Лекції з використанням мультимедійних презентаційї, пояснення, семінарські та практичні заняття, дискусії та дебати, аналіз наукових статей та оглядів, самостійна робота студентів (підготовка презентацій та доповідей).
Необхідне обладнання	Комп'ютер із необхідним програмним забезпеченням, доступ до Internet мережі, проектор.

Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)	Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за наступним співідношенням: • практичні/самостійні тощо: 50% семестрової оцінки: підготовка презентації та виступ з доповіддю на задану тему - 22 бали, розв'язок ситуативної задачі – 20 балів; участь у роботі семінарів – 8 балів. • контрольні заміри (модуль): 50% семестрової оцінки: вирішення тестів – 25 тестів по 2 бали, максимальна кількість балів 50. Жодні форми **порушення академічної доброчесності не толеруються.**
Питання для замірів знань	Модульні завдання містять питання наступних тем: — основи геномного редагування; — ера штучного інтелекту. Нейромережі; — редагування геномів у медицині майбутнього; — фармакогеоміка; — роль штучного інтелекту у медицині майбутнього та геномній медицині; — роль ШІ у розробці і впровадження нових ліків; — біотехнологія, ШІ і медицина майбутнього; — ШІ і етика: виклики і можливості.
Опитування	

Таблиця 1

Схема курсу «Редагування геномів і медицина майбутнього»

Тиж-день	Тема занять (перелік питань	Форма діяльності та обсяг годин	Додаткова література / ресурс для виконання завдань (за потреби)	Термін виконання
1	**Основи геномного редагування.** Поява структурної біологія і геноміки. Секвенування геному людини і його використання. OMIC технології.	Лекції – 4 год, практичні заняття – 2 год, самостійна робота – 8 год		1 тиждень

	Огляд основних технологій геномного редагування: ZFN (Zinc Finger Nucleases) та TALEN (Transcription Activator-like Effector Nucleases) – принципи роботи та застосування. Біотехнологічні інструменти другого покоління: CRISPR-Cas9. Класифікація CRISPR-Cas систем. Загальний принцип дії CRISPR/Cas9 системи. Проблеми та обмеження технологій CRISPR-Cas9. Застосування нанобіотехнологій у сучасній медицині.			
2	**Генна терапія в медицині. Основні принципи** Основні стратегії генної терапії, системи доставки, етапи розробки.	Лекції – 4 год, практ. заняття – 2 год, самостійна робота – 8 год		1 тиждень
3	**Генна терапія в медицині. Успішні кейси** Розбір конкретних клінічних випадків розробки й використання. Порівняння механізму дії, способу доставки, клінічної ефективності та обмежень різних підходів.	Лекції – 4 год, практ. заняття – 2 год, самостійна робота – 8 год		1 тиждень
4	**Фармакогеноміка.** Ліки і війна – нові медичні препарати у 21 столітті. Модель фармацевтичного бізнесу у	Лекції – 4 год, практ. заняття – 2 год, самостійна робота – 8 год		1 тиждень

	21 ст. Джерела фармацевтичних інновацій. Фази клінічних випробувань. Клінічні випробування редагування геному людини.			
5	**Редагування геномів у медицині майбутнього**. Геномне редагування в лікуванні генетичних захворювань (муковісцидоз, хвороба Гентінгтона тощо), в онкології (CAR-T терапія, редагування пухлинних клітин), для боротьби з інфекційними захворюваннями (ВІЛ, герпес). Персоналізована медицина та фармакогеноміка: як геномне редагування формує індивідуальні підходи до лікування. Геномне редагування для покращення людини (human enhancement): концепції та дискусії.	Лекції – 4 год, практ. заняття – 2 год, самостійна робота – 12 год		1 тиждень
6	**Роль штучного інтелекту у медицині майбутнього та геномній медицині.** ШІ як інструмент для дизайну оптимальних гідових РНК та Cas-систем. ШІ у прогнозуванні off-target ефектів та підвищенні точності геномного редагування.	Лекції – 4 год, практ. заняття – 2 год, самостійна робота – 12 год		1 тиждень

	Використання ШІ для аналізу великих обсягів геномних даних та виявлення потенційних терапевтичних мішеней. ШІ у розробці індивідуальних планів лікування та персоналізованої медицини. Автоматизація експериментів та аналізу результатів за допомогою ШІ у лабораторіях геномного редагування. Етичні питання використання ШІ у прийнятті медичних рішень.			
7	**Роль ШІ у розробці і впровадження нових ліків.** *In silico* методи у віртуальному скринінгу за допомогою хемоінформатики. QSAR, *QSPR* і *SAR* аналізи. Роль ШІ у комп'ютерному дизайні ліків. Віртуальні бібліотеки сполук**.** Інструменти віртуального скринінгу на основі ШІ. Моделі для de novo дизайну ліків.	Лекції – 4 год, практ. заняття – 2 год, самостійна робота – 8 год		1 тиждень
8	**Біотехнологія, ШІ і медицина майбутнього.** Інструменти для розшифрування молекулярних структур і біологічних систем.	Лекції – 4 год, практ. заняття – 2 год, самостійна робота – 8 год		1 тиждень

	AlphaFold: прогнозування структури білків. Підходи у ШІ для пов’язування генетичних змін і захворювань.			

Питання для обговорення на семінарах:

1. Порівняйте та протиставте можливості та обмеження технологій ZFN та TALEN у порівнянні з CRISPR-Cas. Чому саме CRISPR-Cas викликав таку революцію в біотехнології? Розгляньте гіпотетичний випадок генетичного захворювання. Які кроки потрібно зробити для визначення потенційної мішені для геномного редагування? Чи виправдане використання геномного редагування для лікування рідкісних, але невиліковних захворювань, якщо існують ризики неочікуваних побічних ефектів?

2. Які основні виклики пов'язані з доставкою CRISPR-Cas систем до різних типів клітин і тканин *in vivo*? Які підходи є найперспективнішими? Як ви вважаєте, які модифікації CRISPR-Cas систем (наприклад, Base Editors**,** Prime Editors) мають найбільший потенціал для клінічного застосування і чому? Чи повинні вчені мати можливість патентувати CRISPR-Cas технології? Обговоріть аргументи "за" та "проти" з погляду інновацій, доступності та етики.

3. Як геномне редагування, у поєднанні з іншими "омікcними" даними, може повністю змінити підхід до лікування раку або аутоімунних захворювань? Наведіть конкретні приклади. Яким чином доступність технологій геномного редагування може вплинути на соціальну рівність та доступ до медичних послуг? Чи є ризик поглиблення "генетичної" нерівності? Уявіть 2100 рік. Які хвороби, на вашу думку, будуть лікуватися за допомогою геномного редагування? Чи будуть і які "покращення" людини (human enhancement) доступні?

4. На вашу думку, чи є фундаментальна різниця між редагуванням соматичних клітин та редагуванням зародкової лінії/ембріона? Якщо так, то де проходить межа дозволеного? Штучний інтелект може допомогти у виборі найкращих стратегій геномного редагування. Але чи повинні ми довіряти ШІ прийняття остаточних рішень щодо генетичних втручань у людину? Які етичні ризики існують?

5. У майбутньому ШІ може стати активним учасником наукових відкриттів у галузі геномного редагування. Як це змінить ландшафт досліджень, патентування та авторства?

Ситуативні задачі

Ситуація 1: У пацієнта виявлено точкову мутацію (одна заміна нуклеотиду) у гені *HBB*, що спричиняє серпоподібноклітинну анемію.

Завдання:

Яку технологію редагування геному доцільніше застосувати і чому?
Чи є переваги base editing або prime editing у цьому випадку?
Які ризики off-target ефектів можливі?

Ситуація 2: Розглядається два підходи лікування спадкового імунодефіциту: редагування гемопоетичних стовбурових клітин *ex vivo* і безпосереднє *in vivo* введення CRISPR/Cas-системи

Завдання:
Порівняйте ризики та переваги обох підходів.
Який варіант є більш контрольованим?
Які етичні аспекти слід врахувати?

Ситуація 3: У доклінічному дослідженні CRISPR-терапії виявлено несподівані мутації в ділянках геному, не пов'язаних з мішенню.

Завдання:
Які молекулярні причини виникнення off-target ефектів?
Як їх можна виявити експериментально?
Які стратегії мінімізації ви б запропонували?

Ситуація 4: У дослідженні пропонується пригнічення експресії онкогена без зміни послідовності ДНК.

Завдання:
Який підхід редагування доцільний у цьому випадку?
У чому принципова відмінність епігеномного та геномного редагування?
Чи є такий підхід більш безпечним?

Ситуація 5: У двох пацієнтів однаковий діагноз, але різні варіанти мутацій.

Завдання:
Чому універсальна CRISPR-терапія може бути неефективною?
Як редагування геному інтегрується в персоналізовану медицину?
Яку роль може відігравати штучний інтелект?

Ситуація 6: Прогнозується широке впровадження геномного редагування в профілактичну медицину.

Завдання:
Які потенційні переваги такого підходу?
Які соціальні та біоетичні ризики можуть виникнути?
Чи готове суспільство до таких змін?

Ситуація 7: Через 3 роки після успішної CRISPR-терапії виявлено хромосомні перебудови в частини клітин.

Завдання:
Які механізми могли призвести до пізніх геномних порушень?
Які методи довготривалого моніторингу ви б застосували?
Чи можна вважати терапію безпечною з клінічної точки зору?

Як це впливає на інформовану згоду пацієнтів?

- **Ситуація 8 :**

ШІ-алгоритм пропонує оптимальні мішені для редагування, які складно інтерпретувати біологічно.

Завдання:

Чи можна довіряти «чорній скриньці» в медицині?

Хто несе відповідальність за рішення ШІ?

Як поєднати пропозиції ШІ та геномне редагування?

Чи змінюється роль біолога-дослідника?

Автор Наталія ГОЛУБ

"Погоджено"

Голова методичної ради
біологічного факультету

_____ Віталій ГОНЧАРЕНКО

"09" 02. 2026 р.

Гарант ОПП «Біотехнології та біоінженерія»

_____ Богдан ОСТАШ

"07" 02 2026 р.