

НАЗВА ДИСЦИПЛІНИ: СИГНАЛЬНІ СИСТЕМИ КЛІТИНИ

Навчальні дисципліни аспірантури.

Дисципліни вільного вибору аспіранта (ДВА.3.01.06)

ВИКЛАДАЧ:

Філоненко Валерій Вікторович, доктор біологічних наук, професор, академік НАН України e-mail: filonenko@imbg.org.ua, Маланчук Оксана Миколаївна, кандидат біологічних наук, с.н.с., e-mail: malanchook@ukr.net

ЗАГАЛЬНЕ НАВАНТАЖЕННЯ: 3 кредити ECTS

Заняття в аудиторії: 30 години (12 годин – лекційні заняття, 10 годин – семінарські заняття, 2 години – консультація, 6 годин – модульні контрольні роботи)

Самостійна робота слухачів курсу: 60 годин.

АНОТАЦІЯ

Дисципліна «Сигнальні системи клітини» належить до переліку дисциплін вільного вибору аспіранта. Вона забезпечує особистісний і професійний розвиток аспіранта та спрямована на формування бази знань, достатньої для подальшої успішної самостійної дослідницької роботи при вивченні особливостей механізмів сигнальної трансдукції клітин в умовах норми та при патологічних станах.

МЕТА І ЗАВДАННЯ КУРСУ:

Мета курсу – дати аспірантам уявлення про сучасні погляди на роль сигнальних систем клітини в регуляції клітинного росту, проліферації, диференціації, апоптозу та ін.; розглянути організацію найбільш досліджених сигнальних каскадів та молекулярні механізми їх функціонування; з'ясувати структурно-функціональну організацію сигнальних мереж в цілому; розглянути низку функціональних порушень організму та їхній зв'язок з порушеннями на рівні сигнальних систем клітин; розглянути головні методичні підходи, що застосовуються для досліджень сигнальних механізмів.

РЕЗУЛЬТАТИ НАВЧАННЯ, МЕТОДИ ВИКЛАДАННЯ І ФОРМИ ОЦІНЮВАННЯ

Результати навчання	Методи викладання і навчання	Форми оцінювання
Мати загальні уявлення про структурно-функціональну організацію сигнальних систем клітини, головні компоненти та особливості будови, роль в регуляції клітинних функцій	Лекції, семінарські заняття, самостійна робота	Модульний контроль, іспит
Знати загальні методичні підходи для дослідження сигнальних систем клітини Уживати мовні одиниці з якнайбільшою комунікативною доцільністю.	Лекції, семінарські заняття, самостійна робота	Модульний контроль, іспит

Вміти творчо використовувати у навчальній, дослідницькій та викладацькій діяльності знання щодо закономірностей та механізмів сигнальної трансдукції клітин	Лекції, семінарські заняття, самостійна робота	Модульний контроль, іспит
Вміти аналізувати роль тих чи інших сигнальних молекул у функціонуванні сигнальних шляхів клітини в нормі та при патології	Лекції, семінарські заняття, самостійна робота	Модульний контроль, іспит

ЗМІСТ КУРСУ

Вступне слово

Курс є необхідною складовою вивчення молекулярної біології. Курс охоплює історичний розвиток сигнальних систем клітини та сучасні досягнення у вивченні питань організації та функціонування сигнальних систем клітини, що призводять до запуску і регуляції різноманітних клітинних процесів.

Основним завданням курсу є поглиблене вивчення здобувачами особливостей функціонування сигнальних систем клітини в нормі та при патологічних станах; поглиблене теоретичне вивчення структурно-функціональної організації сигнальних молекул та особливостями передачі сигналу всередину клітини.

Вивчення курсу «Сигнальні системи клітини» забезпечує особистісний і професійний розвиток здобувача та спрямоване на формування бази знань, достатньої для подальшої успішної самостійної дослідницької роботи при вивченні особливостей механізмів сигнальної трансдукції клітин в умовах норми та при патологічних станах. Сучасні та майбутні досягнення новітніх технологій залежатимуть від здатності науковців виважено впливати на регуляцію метаболічних процесів та експресію певних генів в живих організмах на основі характеристик систем сигнальної трансдукції.

З огляду на вищевикладене, окрім фундаментальних знань, у програмі курсу «Сигнальні системи клітини» наведено матеріал щодо можливості застосування знань у практичній діяльності людини, насамперед у медицині тощо. Знання, отримані у результаті засвоєння курсу, можуть бути використані здобувачами у подальшій практичній діяльності у сучасній молекулярній біології, біотехнології та генній інженерії. Зважаючи на такі потреби, до програми курсу із врахуванням міждисциплінарних зв'язків залучено теми із суміжних дисциплін, зокрема, біохімії, імунології, генної інженерії та біотехнології. Крім того, дана дисципліна передбачає вивчення можливості використання сучасної комп'ютерної техніки для вирішення завдань біологічних наук.

Курс розраховано на здобувачів, які вже ознайомилися з базовими біологічними дисциплінами, зокрема такими як: молекулярна біологія, біохімія, загальна та молекулярна генетика, імунологія, біотехнологія, загальна мікробіологія, вірусологія, генна інженерія, біосинтез білка.

Тематичний план лекцій і семінарських занять

№ п/п	Назва лекції	Кількість годин				
		лекції	семінарські заняття	консультації	самостійна робота	контрольна робота
Змістовий модуль 1. Механізм передачі позаклітинних стимулів в клітину						
1	Тема 1. Загальні відомості про сигнальні системи клітини	1			6	
2	Тема 2. Рецепція сигналу	1			6	
3	Тема 3. Передача сигналу в середині клітини	2			8	
	Семінар 1. Роль ядерних рецепторів в регуляції експресії генів		2			
	Модульна контрольна робота 1					2
Змістовий модуль 2. Регуляція сигнальних шляхів клітини						
4	Тема 4. Ковалентна модифікація сигнальних попередників	1			6	
5	Тема 5. Протеази та сигналінг	1			6	
6	Тема 6. Роль сигнальних систем в життєдіяльності клітини	2			8	
	Семінар 2. Роль протеасом в клітинних процесах		2			
	Семінар 3. Рецептори і фактори росту в механізмі канцерогенезу		2			
	Модульна контрольна робота 2					2
Змістовий модуль 3. Порушення внутрішньоклітинної трансдукції за патологічних станів						
7	Тема 7. Наслідки порушення функціонування сигнальних систем	2			6	
8	Тема 8. Методичні підходи до дослідження функціонування сигнальних каскадів за умов патологій	2			6	
	Семінар 4. Сигнальна трансдукція та дизайн ліків		2		8	
	Семінар 5. Методичні аспекти аналізу функціонування сигнальних шляхів		2			
	Модульна контрольна робота 3					2
	Консультації			2		
	ВСЬОГО	12	10	2	60	6

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1

Механізм передачі позаклітинних стимулів в клітину

Лекція 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СИГНАЛЬНІ СИСТЕМИ КЛІТИНИ ТА РЕЦЕПЦІЯ СИГНАЛУ

Завдання для самостійної роботи Клітинна теорія; особливості формування та етапи регуляції клітинної відповіді; методичні підходи до вивчення сигнальних систем клітини; загальна характеристика ліганд-зв'язуючих рецепторів; локалізація рецепторів; структурно-функціональні особливості рецепторів; поверхневі рецептори (рецептор-подібні кінази, серпентинові рецептори, гістидинові кінази); внутрішньоклітинні рецептори

Лекція 2. ПЕРЕДАЧА СИГНАЛУ В СЕРЕДИНІ КЛІТИНИ

Завдання для самостійної роботи Ростові фактори; родина Ras-білків та їх цикли активації; фосфоліпази; іони Ca^{2+} в системі передачі сигналу; адаптерні молекули; ферменти-медіатори клітинної сигналізації; кінцеві мішені; двокомпонентні сигнальні системи клітини.

Семінар 1. РОЛЬ ЯДЕРНИХ РЕЦЕПТОРІВ В РЕГУЛЯЦІЇ ЕКСПРЕСІЇ ГЕНІВ

Контрольні питання:

- 1 Структурні та функціональні особливості ядерних рецепторів.
- 2 Класифікація ядерних рецепторів залежно від їх механізму дії.

Література [1-9]

Модульний контроль № 1

Контрольні запитання:

1. Кальмодулінові кінази
2. Двокомпонентні сигнальні системи
3. Характеристика ліганд-зв'язуючих рецепторів
4. Класифікація рецепторів залежно від їх локалізації
5. Модуляція функціональної активності рецепторів
6. Механізми формування зв'язуючої поверхні.
7. Особливості внутрішньоклітинних рецепторів гормонів
8. Мономерні сигнальні G-білки
9. Каталіз та особливості регуляції фосфоліпази
10. Роль шаперонів в сигнальній трансдукції
11. Трансфери та ізомерази

Рекомендована література: [1 – 8]

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2

Лекція 1. КОВАЛЕНТНА МОДИФІКАЦІЯ СИГНАЛЬНИХ ПОПЕРЕДНИКІВ. ПРОТЕЇНКІНАЗИ ТА СИГНАЛІНГ

Завдання для самостійної роботи Бази даних для визначення сайтів фосфорилювання; кальмодулін-залежні кінрази; протеїнофосфатази подвійної специфічності; протеасомний апарат клітини; убіквітінування

Лекція 2. РОЛЬ СИГНАЛЬНИХ СИСТЕМ В ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ КЛІТИНИ

Завдання для самостійної роботи Асамблеювання та організація макромолекулярних комплексів; аналіз сигнальних шляхів, що опосередковують ріст і розмір клітини; аналіз сигнальних шляхів, що опосередковують диференціацію клітини; аналіз сигнальних шляхів, що опосередковують міграцію клітини; аналіз сигнальних шляхів, що опосередковують аутофагію клітини; аналіз сигнальних шляхів, що опосередковують гіпоксію та окислювальний стрес клітини; сигналінг стовбурових клітин; старіння та апоптоз

Семінар 2. РОЛЬ ПРОТЕАСОМ В КЛІТИННИХ ПРОЦЕСАХ

Контрольні питання:

1. Субодинична організація протеасом.
2. Регуляція активності протеасомного апарату.
3. Ферментативна активність протеасом.

Література [2,3,6,7]

Семінар 3. РЕЦЕПТОРИ І ФАКТОРИ РОСТУ В МЕХАНІЗМІ КАНЦЕРОГЕНЕЗУ

Контрольні питання:

1. Шляхи передачі інформації в ядро
2. Роль факторів росту в механізмі пухлиноутворення
3. Біологія рецепторів та їх участь в контролі проліферації.
4. Зв'язок факторів росту з регуляцією мітотичного циклу.

Література [1, 8]

Модульний контроль № 2

Контрольні запитання:

1. Класи протеїнкіназ.
2. Компоненти PI3K-mTOR сигнального каскаду
3. Класи фосфатаз. Консенсусні мотиви для дефосфорилювання.
4. Компоненти Erk та JNK сигнального каскаду
5. РКВ – роль в апоптозі.
6. Фосфорилювання як головний механізм передачі сигналу в клітині.
7. Протеїнкіназа A
8. PI3K –кінрази: класифікація, субстрати
9. MAPK-кіназний шлях
10. Сигнальні каскади, що залучені до активації апоптозу у відповідь на сигнали різної етіології

11. WNT-сигнальний шлях
12. Різноманітність кіназ Akt в клітині
13. Роль Сер/Тре кінази mTOR в сигнальній трансдукції
14. p38 сигнальний шлях
15. Основні бази даних для визначення сайтів фосфорилування

Рекомендована література: [2, 6, 13 – 23]

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 3

Порушення внутрішньоклітинної трансдукції за патологічних станів

Лекція 1. НАСЛІДКИ ПОРУШЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИГНАЛЬНИХ СИСТЕМ

Завдання для самостійної роботи Сигнальні шляхи, опосередковані інсуліном; нейродегенеративні розлади; фолдинг білків; імунопатології; сигнальні білки як мішені в терапії

Лекція 2. МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИГНАЛЬНИХ КАСКАДІВ ЗА УМОВ ПАТОЛОГІЙ

Завдання для самостійної роботи Принцип роботи конфокального мікроскопа; принцип інвазії та метастазування пухлин; методики прижиттєвого вивчення клітин

Семінар 4. СИГНАЛЬНА ТРАНСДУКЦІЯ ТА ДИЗАЙН ЛІКІВ

Контрольні питання:

1. Яка роль сигнальної трансдукції в дизайні ліків?
2. Які типи методів сигнальної трансдукції використовуються для дизайну ліків та поясніть, в чому їх перевага?
3. Основні етапи дизайну ліків.
4. Наведіть сигнальні молекули, які є потенційними мішенями для дизайну ліків.
5. На прикладі типової схеми сигнального каскаду для GPCR- рецепторів поясніть основні підходи до проведення скринінгу.

Література [9 – 12, 24 - 29]

Семінар 5. МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ АНАЛІЗУ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИГНАЛЬНИХ ШЛЯХІВ

Контрольні питання:

1. Методичні підходи до вивчення регуляції експресії генів на рівні транскрипції.
2. Методи аналізу білок-білкових взаємодій всередині клітини.

Література [3, 7]

Модульний контроль № 3

Контрольні запитання:

1. Сигнальні білки як мішені в терапії

2. Головні структурні мотиви сигнальних молекул та їхня функція.
3. Патології пов'язані з порушеннями на рівні сигналювання.
4. Методичні підходи для визначення сигнальних комплексів.
5. Терапевтичні підходи на основі корегування сигналінгу.
6. Порушення у функціонуванні сигнальних шляхів, що призводить до розвитку діабету.

Рекомендована література: [6 - 8, 17, 18, 20 - 22]

УМОВИ ВИЗНАЧЕННЯ НАВЧАЛЬНОГО РЕЙТИНГУ

Форми оцінювання	Кількість	Максимум балів за 1	Разом
Змістовий модуль	3	25	75
Комплексний підсумковий модуль (іспит)	1	25	25
Разом			100

ВИМОГИ І КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ

Оцінювання успішності студента за кожним із запланованих видів робіт здійснюється у відповідності до таких критеріїв:

Комплексна контрольна робота спрямована на виявлення базового рівня знань та здатності їх використовувати здобувачами вищої освіти ступеня доктора філософії.

Виконання роботи оцінюється за 4-х бальною системою: відмінно, добре, задовільно, незадовільно.

На оцінку “відмінно” (A, 91-100 балів) оцінюється робота, якщо здобувач:
виявив високу теоретичну підготовку та показав всебічні, систематичні і глибокі знання навчально-програмного матеріалу з дисципліни;
показав вміння логічно і послідовно викладати фактичний матеріал, робити висновки;
може вільно виконувати завдання викладача;
проявив творчі здібності у розумінні, викладанні та використанні навчально-програмного матеріалу.

На оцінку “добре” (B, 81-90 балів) оцінюється робота, якщо здобувач:

- виявив високий рівень теоретичних знань та показав повне знання навчально-програмного матеріалу дисципліни;
- виявив вміння послідовно викладати матеріал та відповідати на питання;
- показав системний характер знань.

На оцінку “задовільно” (C, 71-80 балів) оцінюється робота, якщо здобувач:

- виявив високий рівень теоретичних знань, проте допустив деякі неточності у викладенні навчально-програмного матеріалу дисципліни;
- виявив вміння послідовно викладати матеріал, хоча й не у повному обсязі.

На оцінку “незадовільно” (D, 66-70 балів) оцінюється робота, якщо здобувач:
виявив достатню теоретичну підготовку згідно програми дисципліни,

допустив деякі помилки при виконанні завдань викладача, але в основному володіє необхідними знаннями.

На оцінку “задовільно” (E, 60-65 балів) оцінюється робота, якщо здобувач: виявив достатню теоретичну підготовку згідно програми дисципліни, хоча матеріал викладений з суттєвими помилками.

На оцінку “незадовільно” (F, менше, ніж 60 балів) оцінюється робота, якщо здобувач: виявив поверхневі, фрагментарні знання з теоретичного курсу дисципліни,

- допустив принципові помилки при виконанні завдань викладача.

Порядок перерахунку рейтингових показників нормованої 100-бальної шкали оцінювання в національну шкалу та шкалу ECTS

За 100-бальною шкалою	За національною шкалою		За шкалою ECTS
	Екзамен	Залік	
90 – 100	Відмінно	Зараховано	A (відмінно)
85 – 89	Добре		B (дуже добре)
75 – 84			C (добре)
65 – 74	Задовільно		D (задовільно)
60 – 64			E (достатньо)
40 – 59	Незадовільно	Не зараховано	FX (незадовільно – з можливістю повторного складання іспиту)
1 – 39			F (неприйнятно – з обов’язковим повторним вивченням дисципліни)

Мінімальний пороговий рівень оцінки за роботу в семестрі (допуск до іспитуу) складає 40 балів. **У разі отримання оцінки «неприйнятно»** (нижче 40 балів) студент зобов’язаний повторно вивчити дисципліну. У разі отримання оцінки «незадовільно» студент має право на два перескладання: викладачеві та комісії. При цьому максимальна підсумкова оцінка після

перескладання може бути лише «достатньо». Замість перескладання комісії студент може обрати повторне вивчення дисципліни.

ПОЛІТИКА ДОБРОЧЕСНОСТІ

ПОЛІТИКА ДОБРОЧЕСНОСТІ

Виконання навчальних завдань і робота в курсі має відповідати вимогам «Кодексу академічної доброчесності ІМБГ НАНУ», затвердженого Вченою радою ІМБГ НАН України 10 вересня 2019 року, http://imbg.org.ua/docs/education/IMBG_academic_integrity_code.pdf

та вимогам «Положення про систему забезпечення академічної доброчесності в Інституті молекулярної біології і генетики Національної академії наук України від 23 червня 2026 року»: <https://www.imbg.org.ua/docs/education/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%20%D0%B0%D0%BA%D0%B0%D0%B4%D0%BC%D1%96%D1%87%D0%BD%D1%83%20%D0%B4%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%BE%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C%20%D0%86%D0%9C%D0%91%D0%93%20%D0%9D%D0%90%D0%9D%20%D0%A3%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%96%CC%88%D0%BD%D0%B8%202026..pdf>

ФОРМУВАННЯ ПРОГРАМНИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ

Загальні компетентності

- ЗК-1 Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу
- ЗК-2 Здатність використання новітніх інформаційних і комунікаційних технологій
- ЗК-3. Здатність самостійно проводити на сучасному рівні актуальні наукові дослідження
- ЗК-4. Здатність до пошуку, оброблення на аналізі інформації з різних джерел
- ЗК-5. Здатність генерувати нові ідеї (креативність)
- ЗК-6. Здатність працювати в міжнародному науковому просторі
- ЗК-7. Здатність до розробки та управління науковими проєктами
- ЗК-8. Здатність розвиватися, вчитися і самовдосконалюватись
- ЗК-9. Здатність до окреслення та розв'язання на сучасному рівні наукових проблем
- ЗК-10. Здатність діяти з соціальною відповідальністю та громадянською свідомістю

Спеціальні (фахові) компетентності

- СК-1 Здатність застосовувати отримані знання та уміння для вирішення проблем сучасної біології та біохімії
- СК-2 Здатність формулювати наукову проблему та знаходити шляхи її розв'язання, формуючи робочі гіпотези, переосмислювати наявні та створювати нові знання
- СК-3 Здатність визначати завдання біологічного дослідження та обирати адекватні методи для ефективного розв'язання конкретних науково-практичних задач у галузі біології та біохімії
- СК-4 Здатність самостійно проводити наукові дослідження, що ведуть до отримання нових цілісних знань
- СК-5 Здатність до адекватної інтерпретації даних, отриманих в результаті наукового дослідження, та порівняння фактів, виявлених у власних наукових дослідженнях, з сучасними концепціями, гіпотезами та теоріями
- СК-6 Поглиблене знання і розуміння у конкретній галузі біології
- СК-7 Здатність ефективно спілкуватися з широкою науковою спільнотою
- СК-8 Розуміння етичних аспектів наукової діяльності
- СК-9 Здатність розвивати особисте відчуття відповідальності за отримані в ході наукової діяльності результати
- СК-10 Здатність представляти результати власного дослідження широкому загалу фахівців та нефахівців; здатність працювати у команді

ПРОГРАМНІ РЕЗУЛЬТАТИ НАВЧАННЯ

ПР1. Мати сучасні знання в біології: новітні концепції біології, знати сучасне методологічне та інструментальне забезпечення молекулярної біології, молекулярної генетики та біотехнології, інших суміжних предметних галузей знань

ПР2. Вільно спілкуватися з науковою спільнотою та громадськістю в певній галузі наукової та/або професійної діяльності; представляти результати наукових досліджень у наукових публікаціях у фахових вітчизняних та міжнародних виданнях та на конференціях як державною, так і іноземною мовою

ПР3. Знати сучасну фахову літературу у галузі дослідження: фундаментальні зарубіжні та вітчизняні праці, представників наукових шкіл

ПР4. Критично аналізувати наукову літературу та вміти визначати мало досліджені та суперечливі питання; формулювати ідеї та гіпотези, спрямовані на розв'язання досліджуваної проблеми; визначати актуальність власного наукового дослідження, обирати адекватні методи та підходи до його виконання, ініціювати, організовувати та проводити комплексні дослідження в галузі науково-дослідницької діяльності

ПР5. Вміти творчо застосовувати фундаментальні біологічні знання для адекватної оцінки та розв'язання прикладних задач у галузі біотехнології, молекулярної біології, молекулярної генетики

ПР6. Уміння ініціювати наукові та інноваційні проекти в галузі біології та у суміжних галузях науки, які дають можливість переосмислити наявне та створити нове цілісне знання і розв'язувати важливі теоретичні та практичні проблеми біології з дотриманням норм академічної доброчесності з урахуванням соціальних, економічних, та правових аспектів; ініціативність та відповідальність під час їх реалізації

ПР7. Формування системного наукового світогляду, методологічної культури науковця, креативного мислення, філософського осмислення шляхів формулювання нових ідей, історичного досвіду розв'язання проблем в галузі дослідницько-інноваційної діяльності, професійної наукової етики

ПР8. Застосовувати сучасні інструменти і технології пошуку, оброблення та аналізу великого обсягу інформації, використовувати спеціалізовані бази даних та інформаційні системи

ПР9. Підходити до постановки та виконання експериментального завдання з огляду на сучасні уявлення про молекулярні механізми біологічних процесів

ПР10. Вміти залучати в науково-дослідну роботу як традиційні, так і новітні біотехнологічні методи

РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА

Рекомендовані посібники

Основна:

1. Alberts B, Heald R, Johnson A, Morgan DO, Raff M, Roberts K, Walter P. Molecular Biology of the Cell. 7th ed. New York: W.W. Norton & Company; 2022.
2. Lodish H, Berk A, Kaiser CA, Krieger M, Bretscher A, Ploegh H, Amon A, Martin KC, Yaffe MB. Molecular Cell Biology. 9th ed. New York: W.H. Freeman/Macmillan Learning; 2021.
3. Marks F, Klingmüller U, Müller-Decker K. Cellular Signal Processing: An Introduction to the Molecular Mechanisms of Signal Transduction. 2nd ed. New York: Garland Science; 2017.

Додаткова:

4. Scott JD, Pawson T. Cell signaling in space and time: where proteins come together and when they leave. *Science*. 2019;326(5957):1220–1224. doi:10.1126/science.1175668.
5. Bugaj LJ, Lim WA. High-throughput multicolor optogenetics for controlling intracellular signaling and gene expression. *Cell*. 2019;176(6):1393–1407. doi:10.1016/j.cell.2019.01.034.
6. Lavoie H, Gagnon J, Therrien M. ERK signalling: a master regulator of cell behaviour, life and fate. *Nat Rev Mol Cell Biol*. 2020;21:607–632. doi:10.1038/s41580-020-0255-7.
7. Canovas B, Nebreda AR. Diversity and versatility of p38 kinase signalling in health and disease. *Nat Rev Mol Cell Biol*. 2021;22:346–366. doi:10.1038/s41580-020-00322-w.
8. Punekar SR, Velcheti V, Neel BG, Wong KK. The current state of the art and future trends in RAS-targeted cancer therapies. *Nat Rev Clin Oncol*. 2022;19:637–655. doi:10.1038/s41571-022-00671-9.
9. He Y, Sun MM, Zhang GG, Yang J, Chen KS, Xu WW, Li B. Targeting PI3K/Akt signal transduction for cancer therapy. *Signal Transduct Target Ther*. 2021;6:425. doi:10.1038/s41392-021-00828-5.
10. Liu GY, Sabatini DM. mTOR at the nexus of nutrition, growth, ageing and disease. *Nat Rev Mol Cell Biol*. 2020;21:183–203. doi:10.1038/s41580-019-0199-y.
11. Goul C, Peruzzo R, Zoncu R. The molecular basis of nutrient sensing and signalling by mTORC1 in metabolism regulation and disease. *Nat Rev Mol Cell Biol*. 2023;24:857–875. doi:10.1038/s41580-023-00641-8.
12. Yang D, Zhou Q, Labroska V, Qin S, Darbalaei S, Wu Y, et al. G protein-coupled receptors: structure- and function-based drug discovery. *Signal Transduct Target Ther*. 2021;6:7. doi:10.1038/s41392-020-00435-w.
13. Choi E, Duan C, Bai X. Regulation and function of insulin and insulin-like growth factor receptor signalling. *Nat Rev Mol Cell Biol*. 2025;26:558–580. doi:10.1038/s41580-025-00826-3.
14. Hu X, Li J, Fu M, Zhao X, Wang W. The JAK/STAT signaling pathway: from bench to clinic. *Signal Transduct Target Ther*. 2021;6:402. doi:10.1038/s41392-021-00791-1.
15. Perner F, Pahl HL, Zeiser R, et al. Malignant JAK-signaling: at the interface of inflammation and malignant transformation. *Leukemia*. 2025;39:1011–1030. doi:10.1038/s41375-025-02569-8.
16. Liu S, Ren J, ten Dijke P. Targeting TGFβ signal transduction for cancer therapy. *Signal Transduct Target Ther*. 2021;6:8. doi:10.1038/s41392-020-00436-9.
17. Derynck R, Turley SJ, Akhurst RJ. TGFβ biology in cancer progression and immunotherapy. *Nat Rev Clin Oncol*. 2021;18:9–34. doi:10.1038/s41571-020-0403-1.
18. Liu J, Xiao Q, Xiao J, Niu C, Li Y, He S, et al. Wnt/β-catenin signalling: function, biological mechanisms, and therapeutic opportunities. *Signal Transduct Target Ther*. 2022;7:3. doi:10.1038/s41392-021-00762-6.

19. Yu F, Yu C, Li Y, Wu M, Wang Y, Zhou J, et al. Wnt/ β -catenin signaling in cancers and targeted therapies. *Signal Transduct Target Ther*. 2021;6:307. doi:10.1038/s41392-021-00701-5.
20. Verheyen EM, Gottardi CJ. Solving the Wnt nuclear puzzle. *Nat Rev Mol Cell Biol*. 2024;25:597. doi:10.1038/s41580-024-00747-7.
21. Bray SJ, Bigas A. Modes of Notch signalling in development and disease. *Nat Rev Mol Cell Biol*. 2025;26:522–537. doi:10.1038/s41580-025-00835-2.
22. Zhang Y, Beachy PA. Cellular and molecular mechanisms of Hedgehog signalling. *Nat Rev Mol Cell Biol*. 2023;24:668–687. doi:10.1038/s41580-023-00591-1.
23. Moya IM, Halder G. Hippo–YAP/TAZ signalling in organ regeneration and regenerative medicine. *Nat Rev Mol Cell Biol*. 2019;20:211–226. doi:10.1038/s41580-018-0086-y.
24. Romani P, Valcarcel-Jimenez L, Frezza C, Dupont S. Crosstalk between mechanotransduction and metabolism. *Nat Rev Mol Cell Biol*. 2021;22:22–38. doi:10.1038/s41580-020-00306-w.
25. Driskill JH, Pan D. Control of stem cell renewal and fate by YAP and TAZ. *Nat Rev Mol Cell Biol*. 2023;24:895–911. doi:10.1038/s41580-023-00644-5.
26. Yu H, Lin L, Zhang Z, Zhang H, Hu H. Targeting NF- κ B pathway for the therapy of diseases: mechanism and clinical study. *Signal Transduct Target Ther*. 2020;5:209. doi:10.1038/s41392-020-00312-6.
27. Hopfner KP, Hornung V. Molecular mechanisms and cellular functions of cGAS–STING signalling. *Nat Rev Mol Cell Biol*. 2020;21:501–521. doi:10.1038/s41580-020-0244-x.
28. Giorgi C, Marchi S, Pinton P. The machineries, regulation and cellular functions of mitochondrial calcium. *Nat Rev Mol Cell Biol*. 2018;19:713–730. doi:10.1038/s41580-018-0052-8.
29. Cartes-Saavedra B, Ghosh A, Hajnóczky G. The roles of mitochondria in global and local intracellular calcium signalling. *Nat Rev Mol Cell Biol*. 2025;26:456–475. doi:10.1038/s41580-024-00820-1.
30. Sies H, Jones DP. Reactive oxygen species (ROS) as pleiotropic physiological signalling agents. *Nat Rev Mol Cell Biol*. 2020;21:363–383. doi:10.1038/s41580-020-0230-3.
31. Sies H, Mailloux RJ, Jakob U. Fundamentals of redox regulation in biology. *Nat Rev Mol Cell Biol*. 2024;25:701–719. doi:10.1038/s41580-024-00730-2.
32. Lee P, Chandel NS, Simon MC. Cellular adaptation to hypoxia through hypoxia inducible factors and beyond. *Nat Rev Mol Cell Biol*. 2020;21:268–283. doi:10.1038/s41580-020-0227-y.
33. Lee JH, Paull TT. Cellular functions of the protein kinase ATM and their relevance to human disease. *Nat Rev Mol Cell Biol*. 2021;22:796–814. doi:10.1038/s41580-021-00394-2.
34. Yuan J, Ofengeim D. A guide to cell death pathways. *Nat Rev Mol Cell Biol*. 2024;25:379–395. doi:10.1038/s41580-023-00689-6.

Рекомендовані наукові журнали для самостійної роботи та підготовки семінарів:

Nature Reviews Molecular Cell Biology
Nature Cell Biology
Molecular Cell
Cell
Science
Nature
Nature Communications
Cell Reports

Cell Systems
Science Signaling
Signal Transduction and Targeted Therapy
Trends in Cell Biology
Current Opinion in Cell Biology
EMBO Journal
EMBO Reports
Journal of Cell Biology
Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)

Рекомендовані електронні ресурси

1. <https://sites.google.com/site/cellsignalingtutorialphsapbio/types-of-cell-signaling>
2. http://www.wiley.com/college/boyer/0470003790/animations/signal_transduction/signal_transduction.htm
3. <http://biochemweb.org/signaling.shtml>
4. <http://learn.genetics.utah.edu/content/begin/cells/insidestory/>
5. <http://bcs.whfreeman.com/thelifewire/content/chp15/15020.html>
6. <http://www.hartnell.edu/tutorials/biology/signaltransduction.html>
7. <http://www.cellsignal.com/reference/signalvids/>
http://www.biology.arizona.edu/cell_bio/problem_sets/signaling/07t.html