

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ**  
**ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕМАТИЧНИХ МАШИН І СИСТЕМ**

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

рішенням вченої ради  
ІПММС НАН України  
від « 03 » серпня 2022 року  
протокол № 7

**РОБОЧА НАВЧАЛЬНА ПРОГРАМА**  
**ДИСЦИПЛІНИ**

***«МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАВКОЛИШНЬОГО  
СЕРЕДОВИЩА В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ПІДТРИМКИ  
РІШЕНЬ З ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ»***

Третій освітньо-науковий  
рівень вищої освіти – доктор філософії

Спеціальність – 122 Комп'ютерні науки

Київ 2022

## I. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

**Предметом** вивчення навчальної дисципліни є теоретичні і методологічні основи, міжнародні стандарти та алгоритми в сфері математичного моделювання навколишнього середовища для інформаційних систем підтримки рішень з екологічної безпеки.

**Міждисциплінарні зв'язки.** Дисципліна «Чисельні методи розв'язання рівнянь математичних моделей навколишнього середовища», «Математичне та імітаційне моделювання», «Методи оптимізації», «Системи підтримки рішень», «Гідродинаміка навколишнього середовища».

**Метою** навчальної дисципліни “ Математичне моделювання навколишнього середовища в інформаційних системах підтримки рішень з екологічної безпеки” є одержання студентами теоретичних знань та практичних навичок в області створення, інтеграції та використання методів математичного моделювання навколишнього середовища у системах підтримки рішень з екологічної безпеки. Вивчення та засвоєння курсу створять у аспірантів теоретичну, практичну та інформаційну бази, потрібні для їх подальшої практичної і науково-дослідницької професійній інноваційної діяльності.

## II. РОЗПОДІЛ УЧБОВОГО ЧАСУ

Семестр	Семестрова атестація	Всього	Розподіл за семестрами та видами занять				
			Лекції	Практ. заняття	Семінари	Лаб. роботи	Самостійна робота
1	Екзамен	180	120	20	-	-	40
Кількість кредитів		6					

Перелік основних компетенції, що мають бути набути протягом навчання наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Обов'язкові компетентності		Результати навчання
Загальні компетентності	Спеціальні (фахові) компетентності	
<p><b>ЗК01.</b> Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.</p> <p><b>ЗК02.</b> Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.</p> <p><b>ЗК03.</b> Здатність працювати в міжнародному контексті.</p> <p><b>ЗК04.</b> Здатність розв'язувати комплексні проблеми комп'ютерних наук на основі системного наукового світогляду та загального культурного кругозору із дотриманням принципів професійної етики та академічної доброчесності</p>	<p><b>СК01.</b> Здатність виконувати оригінальні дослідження, досягати наукових результатів, які створюють нові знання у комп'ютерних науках та дотичних до них міждисциплінарних напрямках і можуть бути опубліковані у провідних наукових виданнях з комп'ютерних наук та суміжних галузей.</p> <p><b>СК02.</b> Здатність застосовувати сучасні методології, методи та інструменти експериментальних і теоретичних досліджень у сфері комп'ютерних наук, сучасні цифрові технології, бази даних та інші електронні ресурси у науковій та освітній діяльності</p>	<p><b>РН03.</b> Формулювати і перевіряти гіпотези; використовувати для обґрунтування висновків належні докази, зокрема, результати теоретичного аналізу, експериментальних досліджень і математичного та/або комп'ютерного моделювання, наявні літературні дані.</p> <p><b>РН04.</b> Розробляти та досліджувати концептуальні, математичні і комп'ютерні моделі процесів і систем, ефективно використовувати їх для отримання нових знань та/або створення інноваційних продуктів у комп'ютерних науках та дотичних міждисциплінарних напрямках.</p> <p><b>РН05.</b> Планувати і виконувати експериментальні та/або теоретичні дослідження з комп'ютерних наук та дотичних міждисциплінарних напрямків з використанням сучасних інструментів, критично аналізувати результати власних досліджень і результати інших дослідників у контексті усього комплексу сучасних знань щодо</p>

		досліджуваної проблеми. <b>РНО6.</b> Застосовувати сучасні інструменти і технології пошуку, оброблення та аналізу інформації, зокрема, статистичні методи аналізу даних великого обсягу та/або складної структури, спеціалізовані бази даних та інформаційні системи
--	--	---

### III. ЦІЛІ ТА ЗАДАЧІ ДИСЦИПЛІНИ

*Завданнями* навчальної дисципліни «Математичне моделювання навколишнього середовища в інформаційних системах підтримки рішень з екологічної безпеки» є:

- формування систематизованого уявлення щодо сучасних концепцій, математичних методів та алгоритмів моделювання навколишнього середовища;
- одержання практичних навичок застосування сучасних методологій та технологій моделювання навколишнього середовища в інформаційних системах підтримки рішень (СППР) з екологічної безпеки.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми аспіранти повинні:

**знати:**

- термінологію в області математичного моделювання, навколишнього середовища та інформаційних систем підтримки рішень;
- фізичні основи сучасних моделей навколишнього середовища
- методи ідентифікації параметрів та асиміляції даних вимірювань;
- особливості СППР з екологічної безпеки;
- методології використання моделей у СППР;
- основні програмні продукти для підтримки рішень з екологічної безпеки;

**вміти:**

- розробляти математичні моделі навколишнього середовища ;
- розв'язувати завдання з ідентифікації параметрів моделей шляхом асиміляції даних вимірювань
- оцінювати точність моделей та формулювати межі їх застосування
- інтегрувати моделі у СППР
- Використовувати моделі навколишнього середовища для розв'язання практичних завдань з підтримки рішень у галузі екологічної безпеки

## IV. ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН

### IV.1. Розподіл учбового часу по темах

Назва розділів, тем	Розподіл за семестрами та видами занять						
	Всього годин	Лекції, годин	Практ. заняття годин	Семінари, годин	Лаб. роботи, годин,	Комп. практ, годин	Самостійна робота годин
1	2	3	4	5	6	7	8
<p><b>Тема 1. Фізичні основи моделювання навколишнього середовища</b>            Фізичні принципи. Рівняння руху. Хвилі у навколишньому середовищі. Стійкість руху та турбулентність. Струмені, терміки, конвекція. Гравітаційні течії. Обмін вологою та енергією між водою та повітрям. Водозбори річок та ґрунтові води            Динаміка озер та прибережних зон морів.</p>	30	20	4	3			3
<p><b>Тема 2. Математичне моделювання динаміки атмосфери та океану</b>            Квазі-геострофічне наближення. Баротропні хвилі. Моделювання мезомасштабних процесів. Стійкість геофізичних течій. Моделювання планетарного граничного шару. Основи сучасних методів прогнозу погоди. Моделювання загальної циркуляції атмосфери та океану.</p>	30	20	3	3			4
<p><b>Тема 3. Моделі розповсюдження забруднень</b>            Лагранжевий та ейлеровий підхід до задачі розповсюдження забруднень. Аналітичні та автоматизовані розв'язки. Напівемпіричні (гаусові) та сучасні математичні моделі розповсюдження. Параметризації процесів: сорбція/десорбція, вологе та сухе осадження, ресуспензія, тощо. Фізико-хімічні властивості забруднень, радіоактивні забруднення            Основи математичного моделювання екодинаміки та колообігу вуглецю.</p>	30	20	3	4			3
<p><b>Тема 4 Інформаційні системи підтримки рішень з ядерної радіаційної безпеки на підставі математичних моделей навколишнього середовища</b>            Тема состоит из основных разделов:            Радіоактивність у навколишньому середовищі.            Наукові та нормативні підстави прийняття рішень з радіаційної безпеки, поняття про дозу.            Моделі міграції радіонуклідів у навколишньому середовищі            Моделі контрзаходів            Інформаційні системи радіоекологічного моніторингу            Існуючі інформаційні системи підтримки рішень з радіаційної безпеки, їх зв'язок з системами моніторингу.            Режими роботи СППР з радіаційної безпеки, досвід використання на прикладі відомих аварій</p>							

<i>Тема 5. Асиміляція даних вимірювань та ідентифікація параметрів у математичних моделях</i> Байесовський та варіаційний підходи до задачі асиміляції даних вимірювань. Статистичні гіпотези стосовно функції розподілу похибок вимірювань, моделі, априорної інформації. Метод оптимальної інтерполяції. Метод Калмановської фільтрації та пониження рангу методу КФ. Найпростіші варіаційні методи на підставі аналітичних розв'язань рівнянь Ейлера-Лагранжа. Спряжені рівняння та матриця чутливостей у застосуванні варіаційних методів. Методи мінімізації опуклих функціоналів. Методи глобальної оптимізації. Вплив асиміляції даних на результати моделювання.	30	20	3	3			4
<i>Тема 6. Загальні принципи математичного моделювання у СППР з екологічної безпеки</i> Калібрування та верифікація (валідація) математичних моделей. Методи інтегрування математичних моделей в інформаційні системи. Використання моделей для прогнозування навколишнього середовища. Уточнення прогнозних оцінок математичних моделей на підставі методів інтелектуального аналізу даних (регресія, нейронні мережі, тощо). Використання математичних моделей в інформаційних системах моніторингу та для оцінки впливу небезпечних об'єктів на навколишнє середовище. Методи підтримки прийняття рішень на підставі даних розрахунків математичних моделей навколишнього середовища та моделей оцінки впливу.	30	20	3	4			3
<b>Всього за курс</b>	<b>180</b>	<b>120</b>	<b>20</b>	<b>20</b>			<b>20</b>

## V. ПОТОЧНИЙ ТА ПІДСУМКОВИЙ КОНТРОЛЬ

Поточний контроль здійснюється під час проведення лекцій та практичних занять.

Підсумковий контроль – це оцінювання засвоєння студентами всього теоретичного матеріалу та рівня практичної підготовки з навчальної дисципліни.

Підсумкова оцінка виставляється за результатами поточного контролю за шкалою оцінювання, наведеною в таблиці 2.

Таблиця 2

Оцінка (за національною шкалою)	Бали
Атестований з оцінкою "відмінно"	91-100
Атестований з оцінкою "добре"	76-90
Атестований з оцінкою "задовільно"	60-75
Не атестований з оцінкою "незадовільно"	26-59
Не атестований з оцінкою "н/а"	0-25

Підсумковий контроль проводиться у формі **екзамену**.

## VI. ПЕРЕЛІК ЕКЗАМЕНАЦІЙНИХ ПИТАНЬ

### Теоретичні запитання

- 1) Рівняння переносу речовини у рідині або газі. Його виведення.
- 2) Дифузія, коефіцієнт дифузії. Рівняння дифузії.
- 3) Турбулентність. Рівняння турбулентної дифузії як наслідок осереднення рівняння переносу.
- 4) Аналітичні розв'язки рівняння дифузії: миттєвий викид у нерухомому та рухомому середовищі.
- 5) Подібність, П-теорема, метод розмірності.
- 6) Регресія як метод ідентифікації параметрів моделей.
- 7) Лінійна й нелінійна регресія.
- 8) Врахування похибок вимірів й моделі у методі регресії.
- 9) Поняття про нейронні мережі як метод встановлення невідомих залежностей.
- 10) Шар рецепторів, шар асоціативних елементів, суматор, функції активації нейронних мереж.
- 11) Поняття про калібрування, валідація та тестування нейромереж.
- 12) Коваріаційні матриці похибок в оптимальній інтерполяції. Припущення щодо апроксимацій цих матриць.
- 13) Схема оптимальної інтерполяції. Функціоналу якості, мінімізації якого відповідає схема оптимальної інтерполяції.

### Практичні завдання

- \* Приток води в озеро постійний й дорівнює 100 м<sup>3</sup>/с. Витік води з озера спочатку дорівнює 110 м<sup>3</sup>/с, а потім збільшується кожен день на 1 м<sup>3</sup>/с. Початковий об'єм води в озері 10<sup>9</sup> м<sup>3</sup>. Через скільки днів після початкового часу озеро зникне?
- \* Витрати води у річці у місці її впадіння в озеро Q=50 м<sup>3</sup>/с. Концентрація пестицидів у річці 1 мг/л. Яка маса пестицидів впадає у річку за одиницю часу?
- \* В озеро втікає вода з витратою Q (м<sup>3</sup>/с), об'єм озера постійний V [м<sup>3</sup>], у момент t=0 здійснюється залповий викид маси M (кг) речовини. Знайти залежність середньої концентрації забруднювача в озері C(t), вважаючи початкове розчинення миттєвим. Розглянути випадки ,коли коефіцієнт реакції k=0 та k>0.  
 $C_0 = 1 \text{ КГ/м}^3 \cdot k = 5 \cdot 10^{-3} \text{ (1/добу)}$ ,  $V/Q = 100 \text{ діб}$ ,  $t = 1..365 \text{ діб}$ .
- \* Постійна розпаду речовини у озері  $\lambda = 0.005 \text{ 1/добу}$ . Час затримки  $\tau = V/Q = 100 \text{ днів}$ . Концентрація на втоці у озеро  $C_i = 50 \text{ мг/л}$ . Знайти усталене значення.
- \* В озеро постійного об'єму втікає ріка з концентрацією забруднювача  $\tilde{N}_i = 50 \text{ мг/л}$ . Постійна розпаду речовини  $\lambda = 0,005 \text{ 1/добу}$  (тобто за одиницю часу в озері розпадається кількість маси речовини  $R = \lambda CV$ , де C – концентрація речовини у воді озера, V – об'єм озера [м<sup>3</sup>]). Відоме відношення об'єму озера V то притоку води до озера Q [м<sup>3</sup>/добу]:  $\tau = V / Q = 100 \text{ діб}$ . Знайти усталену концентрацію речовини у озері.
- \* Коефіцієнт молекулярної дифузії кофеїну у воді  $D = 0.63 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ . Товщина стінок кишкового 60 мкм, а площа стінок 0.1 м<sup>2</sup>. Вважаючи початкову концентрацію кофеїну 1 мг/л знайти дифузійний потік через стінки та час всмоктування кофеїну у кров людини (тобто час, за який початкова концентрація зменшиться у  $e = 2.7$  рази).
- \* Коефіцієнт теплопровідності бетону  $\chi = 0.5 \text{ Вт/м/К}$ . Товщина стіни: 0.3 м. Площа стіни 50 м<sup>2</sup>. Яку потужність має розвивати обігрівач взимку (при відсутності центрального опалення), щоб підтримувати у

кімнаті температуру 20 С, якщо на подвір'ї 0 С? (теплопровідність – процес аналогічний дифузії; потік тепла за рахунок теплопровідності дорівнює  $Q = -\lambda dT/dz$ )

\* Усталений (постійний у часі) розподіл забруднення вниз по течії річки при постійно діючому джерелі описується рівнянням

$$u \frac{\partial C}{\partial x} - K \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \lambda C = \frac{W}{A} \delta(x-0).$$

Аналітичним розв'язком є наступне:

Запитаня

$$C(x) = C(0) \exp\left[\frac{ux}{2K}(1-\mu)\right], \quad x > 0$$

$$C(x) = C(0) \exp\left[\frac{ux}{2K_x}(1+\mu)\right], \quad x < 0$$

$$C(x) = \frac{W}{A u \mu}$$

$$\mu = \sqrt{1 + \frac{4K\lambda}{u^2}}$$

Знайти залежність розподілу концентрації при дуже малих значеннях коефіцієнта дифузії К та/або сталої розпаду  $\lambda$  до 0.

\* У річці з площею поперечного перерізу  $A = 930 \text{ м}^2$ , швидкістю течії  $u = 0.15 \text{ м/с}$ , зроблений вимір усталеної концентрації С забруднювача в деякій точці нижче за течією від точки скиду:  $C = 10 \text{ мг/л}$ . Вважаючи, що не осадження речовини в річці не відбувається знайти інтенсивність викиду

\* Залежність безрозмірної концентрації на осі симетрії хмари біля поверхні Землі має вигляд :

$$\tilde{c} = 5\tilde{x}^{-1}$$

де

$$\tilde{c} = \frac{C(x, y = 0, z = 0)}{C_s}, \quad \tilde{x} = x / (Q_0^{3/5} g_0^{1/5} / U_r)$$

Вважаючи потужність викиду при випаровуванні хлору  $Q_0 = 100 \text{ м}^3/\text{с}$ , густину хлору при атмосферному тиску  $1.6 \text{ кг/м}^3$ , швидкість вітру  $0.5 \text{ м/с}$ , знайти, на якій відстані концентрація хлору складатиме  $1 \text{ г/м}^3$ . Концентрацію хлору у джерелі вважати рівною густині хлору при атмосферному тиску.

\* Використовуючи метод розмірності знайти формулу (з точності до безрозмірної константи) для усталеної швидкості падіння дуже маленької твердої частинки у полі тяжіння. Радіус частинки  $r$ , густина  $\rho$ , в'язкість повітря  $\mu$  [кг/мс], маса частинки  $m$

\* Швидкість вітру на висоті 10 м дорівнює 5 м/с. Яка буде швидкість вітру на висоті 50 м. Використати логарифмічний закон розподілу швидкості

\* Залежність фізичної величини у від часу t має вигляд:  $y = at + b$ . При значеннях часу  $t_1, t_2, t_3$  отримали значення величини  $y_1, y_2, y_3$ . Застосувати метод регресії для визначення коефіцієнтів залежності a, b та вивести їх в аналітичному виді. А) вважати похибки вимірів однаковими Б) вважати похибки вимірів різними:  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$

\* Одну й ту саму величину виміряли трьома різними приладами з похибками  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  й отримали значення  $y_1, y_2, y_3$ . Якою буде оптимальна оцінка величини у?

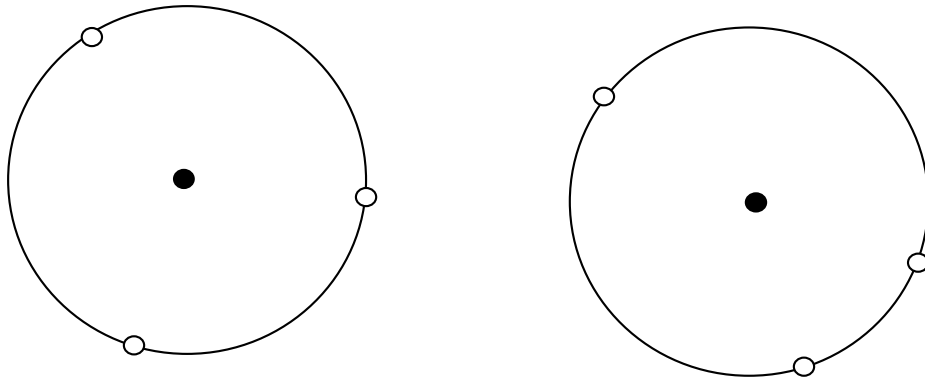


\* Обчислити вручну (використовуючи тільки калькулятор): дисперсії вимірів  $x, y$  та коефіцієнт кореляції.  
Представити проміжні та кінцевий результати розрахунків

X	Y
1	10
2	40
3	150

\* Для попередньої задачі обчислити коваріаційну матрицю для вимірів  $x$  та  $y$ .

\* У якій з точок вимірів (прозорі точки) буде максимальний ваговий коефіцієнт при оптимальній інтерполяції у точку в центрі кола у випадках А) (рис. зліва) і Б) (рис. справа). Чому?



\* У проведеній серії вимірів ( $0 < i < 100$ ) значення величини  $y(i)$  при зміні параметра  $x(i)$  змінювалось в межах від 0.001 до 1000. Як поставити задачу регресійного аналізу параметрів  $a$  та  $b$  залежності  $y = ax^b$  так, щоб залежність описувала поведінку  $i$  при малих,  $i$  при великих значеннях  $y$ ?

\* Вивести залежність сили опору від швидкості руху сферичної кульки у нерухомому середовищі при дуже швидкому і дуже повільному русі.

\* Вивести залежність радіусу фронту ударної хвилі  $r$  від часу  $t$  при дуже сильному вибусі з енергією  $E$  у середовищі з початковою густиною  $\rho$ .

\* У дуже довгому коридорі висотою і шириною 3 м внаслідок руйнування балону відбувся викид 10 г шкідливого газу. Людина відчуває запах газу при концентраціях цього газу вище 10 мкг/л. Від місця аварії до дверей Вашого кабінету 20 м. Через який час Ви відчуєте запах газу? Коефіцієнт дифузії покласти рівним  $5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$

\* Вектор  $y$  містить значення моделі, а вектор  $x$  – значення вимірів. Відомо, що для кращого узгодження моделі з вимірами вектор  $y$  треба помножити на невідому константу  $a$ . Знайдіть значення константи  $a$  таке, що мінімізується середньоквадратичне відхилення  $y$  від  $x$ .

## VII. НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНА ЛІТЕРАТУРА

### Основна література

Schnoor J.L. *Environmental Modeling : Fate and Transport of Pollutants in Water, Air, and Soil (2<sup>nd</sup> Revised Edition)*, Chicester, United Kingdom, [John Wiley and Sons Ltd](#), 2018. – 683 p.

1. Численное моделирование распространения загрязнений в окружающей среде / М.З. Згуровский, В.В. Скопецкий, В.К. Хрущ, Н.Н. Беляев. – Киев: Наукова думка, 1997. – 368 с.
2. Evensen G. *Data assimilation: The ensemble Kalman filter* / Geir Evensen. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – 279 p.
3. Benoit Cushman-Roisin, *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics*. Academic Press, 2011 <http://www.atmosfera.unam.mx/jzavala/OceanografiaFisica/TEXT%20BOOK%202008%20Cushman-Roisin.pdf>

### Базова література

1. Prusov V., Doroshenko A. *Computational Techniques for Modeling Atmospheric Processes*. Hershey PA, USA : IGI Global, 2017. - 460 p.
2. Holton J. , Hakim G. *An Introduction to Dynamical Meteorology (Fifth Edition)*. Oxford, UK: Academic Press, 2013. – 535 p.
3. Монин А.С. *Статистическая гидромеханика, Том 1* / А.С. Монин, А.М. Яглом. – Л.: Гидрометеиздат, 1992. – 696 с.
4. Бруязцкий Е. В. *Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов* / Е. В. Бруязцкий - Киев : ИГМ НАНУ, 2000.- 443 с.
5. Daley R. *Atmospheric data analysis* / Roger Daley. – UK, Cambridge: Cambridge University Press, 1991. – 621 p.
6. Tarantola A., *Inverse problem theory and methods for model parameter estimation* / Albert Tarantola. – USA, Philadelphia: SIAM Publishers, 2005. – 326 p. <http://www.ipgp.fr/~tarantola/Files/Professional/Books/InverseProblemTheory.pdf>

### Допоміжна література

1. Дейнека В.С. *Оптимальное управление неоднородными распределенными системами* / Василий Степанович Дейнека, Иван Васильевич Сергиенко. – К.: Наукова думка, 2003. – 505 с.
2. Куссуль Н.Н. *Grid системы для задач исследования Земли. Архитектура, модели и технологии* / Н.Н. Куссуль, А.Ю. Шелестов. – Киев: Наукова думка, 2008. – 452 с.
3. Хайкин С. *Нейронные сети. Полный курс* / Саймон Хайкин. – М.: ООО “И.Д. Вильямс”, 2006. – 1104 с.
4. Enting I.G. *Inverse problems in atmospheric constituent transport* / Ian G. Enting. – Cambridge: Cambridge University Press, 2002. – 392 p.
5. Sene K., *Hydro-meteorology forecasting and applications* / Kevin Sene. – USA, New York: Springer, 2010 – 355 p.

Програму склали:

д.т.н., с.н.с. **КОВАЛЕЦЬ І.В.**,

д.ф. – м.н., професор **МАДЕРИЧ В.С.**