

## ТЕХНОЛОГІЯ СИНТЕЗУ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ЗА МАТЕМАТИЧНИМИ МОДЕЛЯМИ ПРОЦЕСІВ У НІЙ

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Розглянуто методи і технології формалізації та систематизації математичних та геоінформаційних моделей. Запропоновано удосконалення цих технологій шляхом об'єднання, що дозволить синтезувати геоінформаційну модель, придатну для подальшої трансформації у біхроматичний граф для аналізу за оптимізації топологічної спостережуваності цих систем. Наведено приклад застосування цієї удосконаленої об'єднаної технології.*

**Ключові слова:** геоінформаційна модель, геоінформаційні технології, математична модель, багатозв'язна розподілена система.

### Постановка задачі

Існують розподілені системи різного типу, для яких добре розвинутий апарат математичного моделювання процесів у них, який використовує як звичайні числові, так і досить специфічні просторові дані, що зберігаються, як правило, у різних банках даних (базах даних та електронних картах геоінформаційних систем (ГІС), відповідно), що формалізують як геоінформаційні моделі. Наш час характеризується розвитком банків даних, в першу чергу, на основі веб-технологій, які зберігають величезні обсяги даних («big data»), що постійно оновлюються, інтегруються з іншими банками даних, у т.ч. геопорталами. За таких умов, доцільним є зміна парадигми проектування обчислювальних комплексів. Якщо раніше обчислювальні модулі зазвичай розроблялися для певних математичних моделей, а потім для них проектувати бази даних, то в наш час, оптимальним є адаптування обчислювальних модулів до наявних банків даних. А це, у свою чергу, вимагає розвитку технологій формалізації математичних моделей процесів у системах та їх обчислювальних алгоритмів у такий спосіб, щоб забезпечити їх максимально швидке автоматизоване інтегрування з інформаційною моделлю, що враховує особливості зберігання як вхідних, так і вихідних даних цих моделей. Ця задача частково була розв'язана Є. М. Крижановським і В. Б. Мокіним, які запропонували технологію інтегрування математичних моделей у геоінформаційні системи моніторингу поверхневих вод [2, 8]. За цією технологією по математичних моделях у певний спосіб синтезувались перехідні моделі, які потім вносились у спеціальну програму, розроблену Є. М. Крижановським, та у ній ув'язувались з даними відповідної ГІС. Але ця технологія мала один важливий недолік, що ускладнює її застосування: не було визначено в якому із типових форматів можна зберігати ці перехідні моделі. Цей недолік був усунений в інформаційній технології, запропонованій О. В. Гавенком та В. Б. Мокіним, для синтезу математичних моделей розподілених систем у геоінформаційному просторі параметрів (ГПП) (по суті, у модель у вигляді графа) [1], згідно з якою математичні моделі формалізувались і зберігались у системному шарі ГІС, яка містить дані, необхідні для застосування цих моделей, тобто у типовому форматі векторних даних. Однак, ця технологія мала інший важливий недолік, що ускладнює її застосування: не було визначено яким чином можна автоматизувати процес формалізації математичних моделей у модель у геоінформаційному просторі параметрів. Отже, є актуальним створення інформаційної технології, яка поєднає переваги та буде позбавлена недоліків обох цих технологій, тобто дозволить автоматизовано синтезувати перехідні моделі на основі математичних моделей процесів у розподіленій системі та зберігати їх у типовому форматі векторних даних як частину геоінформаційної моделі, яка є сховищем даних, необхідних для функціонування цих моделей. Розв'язанню цієї задачі і присвячена ця робота.

Для того, щоб не вдаватись у дискусії з приводу поняття ГПП (класифікації виду простору, міри і формалізації), пропонується більш узагальнене поняття — G-модель. G-модель — це модель, що містить всі параметри (характеристики, змінні), які можуть зазнати змін чи є незмінними у часі й просторі, та зв'язки між ними.

Запропонуємо як можна автоматизувати синтез G-моделі у вигляді системного шару геоінформаційної (ГІС) моделі. Важливо відмітити, що у роботах [3, 4] запропоновано яким чином формалізовану у ГПП модель (G-модель) можна трансформувати у спеціальний біхроматичний граф та використати відому технологію перевірки та оптимізації топологічної спостережуваності об'єкта, який описується моделлю, формалізованою у цьому графі. Зазвичай, ця технологія застосовується для електроенергетичних систем [5—7]. Але технологія є універсальною і може застосовуватись і для моделей та систем іншого типу.

*Метою роботи* є розробка технології автоматизації синтезу геоінформаційної моделі розподіленої системи за математичними моделями процесів у ній, яка дозволить прискорити інтегрування обчислювальних модулів у геоінформаційні системи та банки даних та забезпечить зберігання перехідних (адаптованих) математичних моделей у типовому комп'ютерному форматі.

### Систематизація та формалізація даних моделей систем

Використовуючи результати робіт О. В. Гавенка та Є. М. Крижановського проведемо порівняння технологій систематизації основних складових, величин та змінних математичних моделей процесів (табл. 1).

Є. М. Крижановським [2, 8] описано, як величини та змінні математичної моделі взаємодіють із системою управління базою даних (СУБД) та даними ГІС:

Вхідні змінні  $U$  — їх значення зчитуються із бази даних (позначимо множину таблиць бази даних, які можуть зберігати дані, як  $D$ ) та ГІС (позначимо множину таблиць та карт ГІС як  $G$ )






$$U \leftarrow D \cup G. \quad (1)$$

Вихідні змінні  $Y$  — їх значення виводяться на карті ГІС або на екрані (позначимо множину інформації на екрані комп'ютера як  $E$ ) у вигляді таблиці, графіка тощо

$$Y \rightarrow G \cup E. \quad (2)$$

Таблиця 1

Порівняльна характеристика систематизації математичних моделей

Складові моделі	Класифікація Є. М. Крижановського [7]	Класифікація О. В. Гавенка [1]
Змінні, що задаються для проведення обчислень	Вхідні змінні $U$	Тип 1 вершин графа 
Змінні, що є результатом обчислень	Вихідні змінні $Y$	Тип 2 вершин графа 
Змінні, що є результатом обчислення на проміжній стадії розрахунку	Змінні стану $X$	Типи 1, 2 вершин графа  
Параметри, що задаються або обчислюються під час ідентифікації параметрів моделі	Числові параметри $K$	Тип 1 вершин графа 

Змінні стану  $X$  — їх значення тимчасово зберігаються в базах СУБД баз виведення на карті ГІС або на екрані

$$X \rightarrow D. \quad (3)$$

Числові параметри  $K$  — можуть змінюватись під час роботи з моделлю і зберігаються у спеціальних таблицях у базі даних

$$K \leftarrow D. \quad (4)$$

Зберігати інформацію, необхідну для роботи з G-моделлю, можна, використовуючи реляційні бази даних. Реляційні бази даних дозволяють зберігати інформацію у двовимірних таблицях, зв'язаних за допомогою ключових полів даних.

Проведемо аналогію між типами даних математичних моделей і моделей баз даних (табл. 2) [8].

Аналоги типів даних у математичних моделях і моделях баз даних

В математичних моделях	В моделях баз даних
Значення параметра $x$	Таблиця з одним полем та одним записом
Вектор-рядок значень $m$ параметрів	Таблиця з $m$ полями та одним записом
Вектор-стовпець значень одного параметра, наприклад, дискретні значення показника $X[m]$ , виміряні з однаковим інтервалом у моменти часу $m = 1, 2, \dots$	Таблиця з одним полем та $m$ записами
Матриця $[m \times n]$ ; значення показника $X(t, z)$ в точках річки з координатами $z$ у різні моменти часу $t$	Таблиця з $n$ полями та $m$ записами

Таким чином, основна ідея запропонованої Є. М. Крижановським технології [7] полягає у формуванні множини перехідних понять, моделей та методів, що є загальноприйнятими у класичній математиці, і для яких можна знайти аналоги в теорії баз даних (БД) та ГІС-технологій, а типові поняття, моделі та методи математичної обробки даних, теорії баз даних та ГІС-технологій приводяться до перехідних. Тому, застосування методу обмежується тими математичними моделями, які коректно можуть бути зведені до відповідних перехідних моделей.

Основним оператором, що використовується для процесу зчитування інформації з бази даних для проведення розрахунків за математичною моделлю, є оператор SELECT. Вибір значень з полів (Par1, Par 2, ..., Par r) з таблиці T, що відповідають заданим критеріям відбору  $\Omega$ , проводять за виразом

$$\text{SELECT Par1, Par 2, ..., Par r FROM T WHERE } \Omega. \quad (5)$$

Результатом операції SELECT є нова таблиця, що містить поля Par1, Par 2, ..., Par r, назви яких вказані між виразами SELECT і FROM у (5).

Таким чином, використання СУБД дозволяє проводити синтез G-моделі, використовуючи автоматизоване формування переліку необхідних даних, відповідно до стану системи, що моделюється. Аналогічно, шляхом створення запиту на вибірку, перелік вхідних даних та коефіцієнтів може бути доповнений, у разі недостатньої кількості інформації для визначення топологічної спостережуваності досліджуваної системи.

У роботах [3, 4] розроблена технологія трансформації G-моделі (ГПП) у класичний біхроматичний граф, на якому можливий пошук максимальних паросполучень та топологічної спостережуваності. Тому пропонується доповнити технологію Крижановського Є. М. інтегрування математичних моделей в геоінформаційні технології синтезу G-моделі у вигляді системного шару цих ГІС-моделей, що дозволить пришвидшити процес побудови G-моделей за математичними моделями процесів у динамічних багатозв'язних просторово-розподілених системах різного типу, і водночас дасть можливість в подальшому використанні інструментарію аналізу та оптимізації топологічної спостережуваності цих систем. Доповнений запропонований алгоритм об'єднаної технології є таким:

1. Перетворення математичної моделі та її величин до форм, поданих у табл. 2.
2. Виділення ключових фізичних об'єктів, з якими працює модель, та визначення і формалізація відношень між ними.
3. Проектування бази даних, відповідно до сформованих моделей.
4. Визначення розмірності розподіленості у просторі та зміни в часі параметрів ключових фізичних об'єктів і відповідне налагодження класифікатору ГІС.
5. Формалізація процесу обміну даними між математичною моделлю та БД через оператори Select та Insert.
6. Синтез G-моделі у вигляді системного шару ГІС.
7. Трансформація G-моделі у класичний біхроматичний граф для пошуку топологічної спостережуваності, у разі необхідності удосконалення математичної та геоінформаційної моделі для забезпечення повної спостережуваності системи.

### Приклад застосування технології

Розглянемо приклад застосування запропонованої технології. Проілюструємо технологію, використовуючи одновимірну модель Фролова—Родзилера [9, 10]. Ця модель описує зміну концентрації забруднювальної речовини  $x$  у максимально забрудненому усередненому потоці річки від місця скиду стічних вод до місця  $L$  повного змішування цих вод з річковими [9, 10]:

$$x = x_k + (u - x_k)e^{-\beta\sqrt{l}}, \quad 0 \leq l < L; \quad (6)$$

$$x_k = \frac{uq + x_0Q}{q + Q}, \quad l \geq L, \quad (7)$$

де  $x_k$  — кінцева усереднена концентрація забруднювальної речовини у створі повного змішування;  $u$  — концентрація речовини у стічних водах з витратами  $q$ ;  $x_0$  та  $Q$  — концентрація речовини та витрати води у річці вище створу випуску стічних вод;  $l$  — відстань вздовж фарватеру від місця випуску стічних вод до створу, що розглядається;  $\beta$  — коефіцієнт, який враховує гідравлічні умови змішування [9],

$$\beta = \zeta\phi \sqrt[3]{\frac{E}{q}}, \quad (8)$$

де  $\zeta$  — коефіцієнт, який залежить від місця випуску стоку в річку: біля берега —  $\zeta = 1$ , в фарватері річки, тобто в місці найбільших швидкостей —  $\zeta = 1,5$ ;  $\phi$  — коефіцієнт звивистості річки, тобто відношення відстані по фарватеру  $L_f$  — довжини річки від випуску стічних вод до створу пункту водокористування, що розглядається, до відстані між цими двома пунктами по прямій  $L_p$ ;  $E$  — коефіцієнт турбулентної дифузії, який може визначатись за різними формулами [9]:

— для рівнинних річок М. В. Потапова

$$E = Hv/200, \quad (9)$$

де  $v$  — середня швидкість течії на ділянці змішування;  $H$  — середня глибина річки;

— для усіх проточних водойм В. М. Макавєєва

$$E = \frac{gHv}{2mC}, \quad (10)$$

де  $g$  — прискорення сили тяжіння, тобто 9,81 м/с;  $m$  — коефіцієнт Бусінського для води, тобто 22,3;  $C$  — коефіцієнт Шезі, який визначається за формулою [9]

$$C = \frac{1}{n} \sqrt[3]{H}, \quad (11)$$

де  $n$  — коефіцієнт шорсткості за М. Ф. Срібним, який визначається за таблицею у роботі [9].

І. Д. Родзилер уточнив міркування В. А. Фролова. Він стверджував, що в моделі (1), (2) слід досліджувати не всю концентрацію  $x$ , а лише величину її приросту  $x_p = u - x_0$ , тоді вся кількість забруднення, яке вноситься у водойму зі стічними водами, складатиме  $q_{xp}$ . У цьому разі рівняння (1) записується таким чином:

$$x - x_0 = x_k - x_0 + [(u - x_0) - (x_k - x_0)]e^{-\beta\sqrt{l}}, \quad 0 \leq l < L. \quad (12)$$

Причина великого поширення моделі (1)—(7) зрозуміла — для її використання необхідна мінімальна кількість даних. Усі особливості кожної річки на кожній ділянці характеризує тільки параметр  $\beta$ , який визначається за паспортними (довідковими) даними річок.

Відповідно до алгоритму запропонованої технології проводимо перетворення математичної моделі та її величин до форм, показаних у табл. 2. Проводимо виділення ключових фізичних об'єктів, з якими працює модель, та визначаємо і формалізуємо відношення між ними.

Таблиця 3

Класифікація змінних математичної моделі за Є. М. Крижановським

Типи даних	Змінні математичної моделі	Типи даних	Змінні математичної моделі
Вхідні змінні $U$	$x_0, u, l, L, q, Q, v, H$ <div style="text-align: center;"><math>H</math> ●</div>	Змінні стану $X$	$x_k, \beta, E, C$ <div style="text-align: center;"><math>\beta</math> ○</div>
Вихідні змінні $Y$	$x$ <div style="text-align: center;"><math>x</math> ○</div>	Числові параметри $K$	$\zeta, \phi, g, m, n$ <div style="text-align: center;"><math>\phi</math> ●</div>

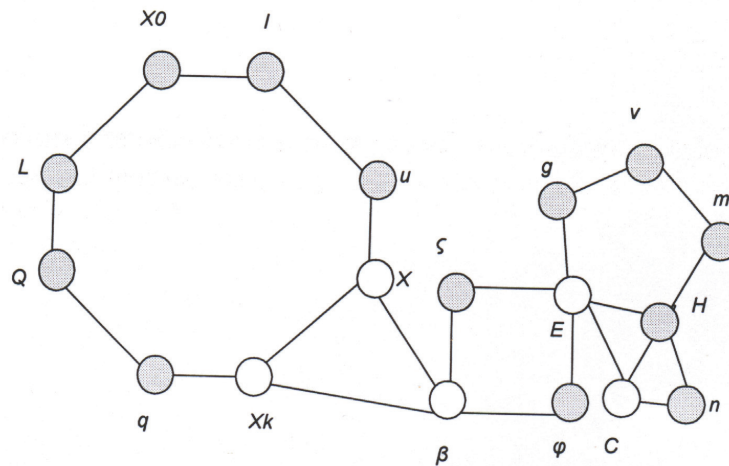
Наступним кроком є проектування бази даних, відповідно до сформованих моделей. Через оператор Select проводиться формалізація процесу обміну даними між математичною моделлю та БД. Вибір значень з полів (Par1, Par 2, ... Par n) з таблиці Data, що відповідають заданим критеріям відбору, проводять за виразом

SELECT Par  $u$ , Par  $l$ , Par  $x_0$ , Par  $L$ , Par  $q$ , Par  $Q$ , Par  $v$ , Par  $H$  FROM Data WHERE Par  $l \geq$  Par  $L$ .

Результатом операції SELECT є нова таблиця, що містить поля Par  $u$ , Par  $l$ , Par  $x_0$ , Par  $L$ , Par  $q$ , Par  $Q$ , Par  $v$ , Par  $H$ , назви яких вказані між виразами SELECT і FROM.

Використовуючи класифіковані за Є. М. Крижановським дані переходимо до формалізації математичної моделі у геоінформаційному просторі параметрів. Відповідно виділимо основні змінні та коефіцієнти, що характеризують, запропоновану до розгляду, модель:  $x$ ,  $x_k$ ,  $x_0$ ,  $u$ ,  $\beta$ ,  $l$ ,  $L$ ,  $q$ ,  $E$ ,  $Q$ ,  $\zeta$ ,  $\varphi$ ,  $v$ ,  $H$ ,  $g$ ,  $m$ ,  $C$ ,  $n$ .

Геоінформаційний простір параметрів (G-модель) такої математичної моделі матиме вигляд, як на рисунку.



Модель Фролова—Родзиллера, формалізована у геоінформаційному просторі її параметрів

Відповідно до алгоритму технології, запропонованого у роботах [3, 4], можливе подальше перетворення вищенаведеного ГПП у біхроматичний граф, а також здійснення перевірки та оптимізації топологічної спостережуваності цієї моделі.

### Висновки

Розглянуто дві технології побудови геоінформаційних моделей систем за математичними моделями процесів у них. Запропоновано технологію автоматизації синтезу геоінформаційної моделі розподіленої системи за математичними моделями процесів у ній, яка дозволить прискорити інтегрування обчислювальних модулів у геоінформаційні системи та банки даних і забезпечить зберігання перехідних (адаптованих) математичних моделей у типовому комп'ютерному форматі.

Запропоновано удосконалення цих технологій шляхом об'єднання, що дозволить синтезувати геоінформаційну модель, придатну для подальшої трансформації у біхроматичний граф для аналізу за оптимізації топологічної спостережуваності цих систем.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Інформаційні технології автоматизації обробки параметрів геоінформаційних систем з геометричними мережами : монографія / [В. Б. Мокін, В. Г. Сторчак, Є. М. Крижановський та ін.]. — Вінниця : ВНТУ, 2014. — 196 с.
2. Мокін В. Б. Інформаційна технологія інтегрування математичних моделей у геоінформаційні системи моніторингу поверхневих вод : монографія / В. Б. Мокін, Є. М. Крижановський, М. П. Боцула. — Вінниця : ВНТУ, 2011. — 152 с.
3. Варчук І. В. Новий підхід до визначення топологічної спостережуваності багатозв'язних просторово-розподілених систем на основі їх моделей у геоінформаційному просторі параметрів / І. В. Варчук, В. Б. Мокін // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2014) : зб. праць XII Міжнародної конференції, Вінниця, 14—16 жовтня 2014 р. — Вінниця: ВНТУ, 2014. — С. 16.
4. Варчук І. В. Метод визначення топологічної спостережуваності моделей екологічних систем з використанням геоінформаційного простору параметрів / І. В. Варчук // V-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю : зб. праць. — Вінниця, 2015. — 91 с.
5. Гамм А. З. Сенсоры и слабые места в электроэнергетических системах / А. З. Гамм, И. И. Голуб. — Иркутск : СЭИ СО РАН, 1996. — 99 с.

6. Савина Н. В. Системный анализ потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях в условиях неопределенности : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.14.02 «Электростанции и электроэнергетические системы» / Савина Наталья Викторовна. — Благовещенск, 2010. — 20 с.

7. Кігель А. Г. Особливості застосування інформаційних технологій в електричних мережах / А. Г. Кігель // Науковий вісник Національного гірничого університету. — Дніпропетровськ, 2011. — № 6. — С. 121—126.

8. Мокін В. Б. Новый метод синтеза геоинформационных моделей природных систем за математическими моделями процессов у них / В. Б. Мокін, С. М. Крижановський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — Вінниця, 2007. — № 4. — С. 40—47.

9. Родзиллер И. Д. Прогноз качества воды водоемов-приемников сточных вод / И. Д. Родзиллер. — М. : Стройиздат, 1984. — 263 с.

10. Фролов В. А. Определение степени смешения сточных вод с водой водотока / В. А. Фролов // Производственные сточные воды : сб. статей и инструктивных материалов. — Вып. 2. — М. : Медгиз, 1950. — С. 134—141.

Рекомендована кафедрою комп'ютерного еколого-економічного моніторингу та інженерної графіки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 23.11.2015

**Варчук Ілона Вячеславівна** — аспірантка кафедри комп'ютерного еколого-економічного моніторингу та інженерної графіки, e-mail: ilona-varchuk@mail.ru .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**I. V. Varchuk<sup>1</sup>**

## **Technology of Synthesis of Geoinformation Model of a Distributed System of Mathematical Models of its Processes**

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

*There have been considered the methods and technologies of formalization and systematization of mathematical and information models. There have been proposed improvements in these technologies by their combining, which will help to synthesize geographic information model that is suitable for further transformation in bichromatic graph analysis to optimize the topological observability of these systems. An example of the application of this advanced technology has been suggested.*

**Keywords:** GIS model, geographic information technology, mathematical model, multiply distributed system.

**Varchuk Ilona. V.** — Post-Graduate Student of the Chair of Computer Aided Ecological and Economic Monitoring and Engineering Graphics, e-mail: ilona-varchuk@mail.ru

**И. В. Варчук<sup>1</sup>**

## **Технология синтеза геоинформационной модели распределенной системы по математическим моделям процессов в ней**

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Рассмотрены методы и технологии формализации и систематизации математических и информационных моделей. Предложено усовершенствование этих технологии путем объединения, что позволит синтезировать геоинформационную модель, пригодную для дальнейшей трансформации в бихроматический граф для анализа при оптимизации топологической наблюдаемости этих систем. Приведен пример применения этой усовершенствованной объединенной технологии.*

**Ключевые слова:** геоинформационная модель, геоинформационные технологии, математическая модель, многосвязная распределенная система.

**Варчук Илона Вячеславовна** — аспирант кафедры компьютерного эколого-экономического мониторинга и инженерной графика, e-mail: ilona-varchuk@mail.ru