

**ЗАСТОСУВАННЯ СТРУКТУРНИХ ПІДХОДІВ ДО  
РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ АНАЛІЗУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ  
ПОВЕДІНКИ ЕКОЛОГІЧНИХ НЕПЕРІОДИЧНИХ ПРОЦЕСІВ  
ГЕОЛОГІЧНОЇ ПРИРОДИ**

**Ю.М. СЕЛІН**

Розглянуто один із можливих варіантів розв'язання задач аналізу та прогнозування поведінки екологічних неперіодичних процесів геологічної природи за допомогою структурних підходів, застосованих у модифікованому методі подібних траєкторій. Наведено приклад застосування методу до розв'язання практичних задач прогнозування екологічних процесів геологічної природи.

В останні роки світове суспільство підійшло з усією очевидністю до системної кризи, яка складається з економічної, соціальної, демографічної і, насамперед, екологічної криз. Особливо гостро стоїть проблема забруднення навколишнього середовища. Вона утворюється із екологічних, економічних та соціальних аспектів. Зважаючи на це, стає зрозумілим важливість вирішення проблеми прогнозування різних видів екологічно небезпечних процесів, їх природи та наслідків. Слід зазначити, що дані про екологічні процеси у своїй більшості мають вигляд часових рядів.

Існує дві великі групи методів прогнозування екологічних процесів, які застосовуються в системах прийняття рішень. Одна група — за допомогою рівнянь математичної фізики. Використовується математична модель фізичного процесу [6,8]. Наприклад, широко поширені моделі базуються на рівняннях газодинаміки і математичному опису процесу за допомогою рівнянь турбулентної дифузії та масопереносу [4,5]. Після визначення коефіцієнтів моделі можна зробити прогноз, зокрема щодо розповсюдження шкідливих домішок в атмосфері або рідині. Певним недоліком таких методів є практична неможливість отримати адекватний довгостроковий прогноз, а також неможливість зробити прогноз на великих площах (кілометрах ґрунтових та поверхневих вод, десятках кілометрів атмосфери).

Друга група поєднує емпірико-статистичні методи [7] досліджування екологічних процесів. За допомогою цих методів йде пошук закономірностей поведінки процесу в просторі і часі. Прогноз можна зробити як короткостроковий, так і довгостроковий.

Але всі вони не враховують певну періодичність процесів такого роду. Екологічні процеси можуть повторюватися через певний, але не завжди од-

наковий час, тобто період має несезонний характер. Наприклад, виверження вулканів, зсуви гірських схилів в Криму або паводки в Закарпатті. Постає питання розробки методів прогнозування екологічних процесів на базі статистичних підходів, які використовують цю властивість з метою впровадження математичного наповнення до інформаційного забезпечення у системах підтримки прийняття рішень. Під терміном прогнозування екологічних процесів розуміється таке. По-перше, стоїть задача передбачити сам факт появи певного процесу. По-друге, спрогнозувати його інтенсивність і час протікання з метою подати інформацію до системи підтримки прийняття рішення для адекватного реагування на той чи інший процес або передбачення його наслідків.

Одним із можливих статистичних підходів є аналіз поведінки часових рядів екологічного походження, тобто рядів, компоненти яких залежать від часу. Розглянемо часові ряди з даними однієї природи. Відповідно, значення в них підпорядковуються певним закономірностям, які ми, власне, і прагнемо знайти. У випадку екологічних процесів це означає знайти інтервали впливів різних факторів і визначити факт існування цих впливів.

Такий аналіз є також одним із важливих підходів до вивчення процесів у соціальних, фізичних, економічних та іншого роду системах. Завдяки такому аналізу, і, як наслідок, розумінню закономірностей поведінки часових рядів відповідної природи, можна приймати обґрунтовані рішення відносно прогнозу, розробляти тактичні та стратегічні кроки майбутньої поведінки, зокрема, для числових рядів екологічного походження, передбачити можливі виникнення негативних наслідків екологічних процесів або скористатися можливими сприятливими.

Добре відомий метод пошуку таких закономірностей — метод подібних траєкторій [1]. Ідея методу така.

Маємо ряд спостережень екологічного процесу за час  $\{y(1), y(2), \dots, y(n)\}$  (рис. 1), де змінні  $y(i)$ ,  $i = \overline{1, N}$  є фізичними значеннями відповідного процесу (сила вітру, інтенсивність стоку води, сила підземних поштовхів).

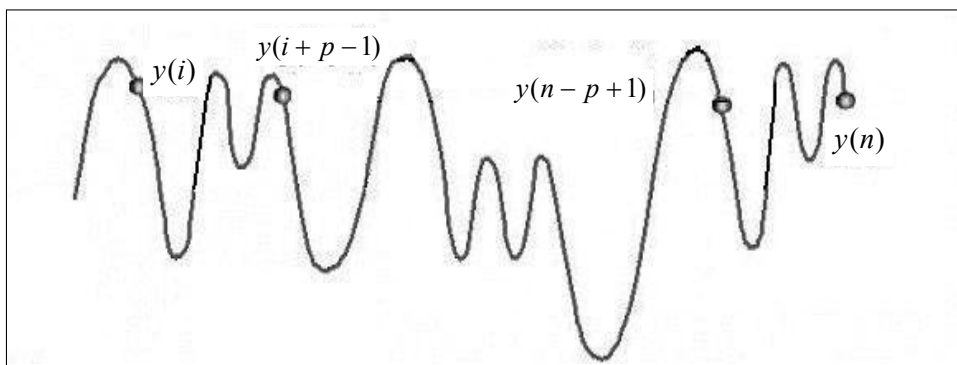


Рис. 1. Динаміка ряду спостережень

За певним критерієм обирається ділянка траєкторії, найближча до ділянки, що передуює прогнозній точці. Потім робиться прогноз за формулою  $\hat{y}(k+s) = y(I+J+s-1)$ , де

$$I = \min \left\{ \sum_{i=1}^p |y(j+i-1) - y(n-p+i)| \right\} \quad J = 1, 2, \dots, n-p,$$

$$J = \min |y(i+j-1) - y(n)| \quad i = I, I+1, \dots, I+p-1.$$

Формалізувати метод можна таким чином. Нехай маємо вектори спостережень  $Y_1 = (y_1, y_2, \dots, y_p)^T$ ;  $Y_2 = (y_2, y_3, \dots, y_{p+1})^T$ ; ...;  $Y_K = (y_k, y_{k+1}, \dots, y_{k+p-1})^T$ ; ...;  $Y_N = (y_{n-p+1}, y_{n-p+2}, \dots, y_n)^T$ .

Знаходимо найближчу точку з умови мінімальної відстані

$$Y_k = \arg \min_j d(Y_n, Y_j).$$

Є й інші способи пошуку найближчої точки, наприклад, найбільш поширена метрика — квадрат евклідової відстані

$$d(Y_k, Y_n) = (Y_k - Y_n)^T (Y_k - Y_n).$$

Модифікація методу подібних траєкторій. Нехай маємо ряд спостережень  $\{y(1), y(2), \dots, y(n)\}$ , а вектори, які ми маємо відшукати, мають вигляд

$$Y_K = (y_k, y_{k+1}, \dots, y_{k+p-1})^T; \dots; Y_N = (y_{n-p+1}, y_{n-p+2}, \dots, y_n)^T.$$

При цьому

$$y_k = y_{n-p+1} + A; \quad y_{k+1} = y_{n-p+2} + A; \quad y_{k+p-1} = y_n + A,$$

тобто  $\bar{Y}_K = \bar{Y}_N + A$ , де  $A = \text{const}$  означає, що процеси мають різні інтенсивності. Тобто маємо однакові процеси, які відбуваються на різних рівнях значень. Константа  $A$  заздалегідь невідома.

Тобто маємо процес, для котрого справедливим є графік, зображений на рис. 2.

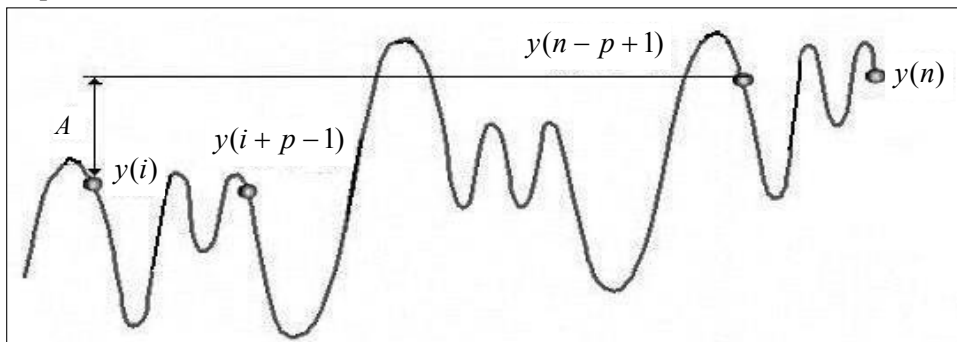


Рис. 2. Динаміка ряду спостережень зі зсувом

Щоб не визначати рівень траєкторії, тобто не визначати ці константи, будемо шукати різниці між сусідніми значеннями.

Наприклад, розглянемо дві частини одного ряду спостережень.

$$\bar{Y}_N = 8,3 \quad 10,1 \quad 8,7 \quad 7,4 \quad 6,7 \quad 7,6 \quad 8,5 \quad 7,4 \quad 6,8 \quad 7,7 \quad 8,6 \quad 7,5$$

$$\bar{Y}_K = 5,9 \quad 7,7 \quad 6,3 \quad 5 \quad 4,3 \quad 5,2 \quad 6,1 \quad 5 \quad 4,4 \quad 5,3 \quad 6,2 \quad 5,1$$

Знайдемо різниці між сусідніми значеннями обох векторів.

$$Y_n - Y_{n+1} = -1,8 \quad 1,4 \quad 1,3 \quad 0,7 \quad -0,9 \quad -0,9 \quad 1,1 \quad 0,6 \quad -0,9 \quad -0,9 \quad 1,1$$

$$Y_k - Y_{k+1} = -1,8 \quad 1,4 \quad 1,3 \quad 0,7 \quad -0,9 \quad -0,9 \quad 1,1 \quad 0,6 \quad -0,9 \quad -0,9 \quad 1,1$$

Як бачимо, обидва вектори мають однакову траєкторію, але на різних рівнях.

Тож проблему прогнозування можна розділити на дві частини. Перша — відшукати проміжки траєкторій, на котрих повторюються процеси. Друга — за допомогою набраної статистики зробити прогноз розвитку відповідного процесу.

Для пошуку траєкторій, де є повторювання на різних рівнях, розробимо алгоритм, головну ідею якого наведено у роботі [2].

Нехай маємо ряд спостережень  $\{y(1), y(2), \dots, y(n)\}$ , де  $y(i)$ ,  $i = \overline{1, N}$  — це деякі значення, отримані в ході спостереження з часовим кроком  $\Delta t_i = \text{const}$ ,  $i = \overline{1, N}$ .

Обчислимо перші різниці  $\Delta y(i) = y(i) - y(i+1)$ ,  $i = \overline{1, N-1}$  між сусідніми значеннями ряду.

Далі використаємо структурний підхід [3], який раніше застосовувався в методах розпізнавання образів. Ранжуємо ці різниці, наприклад, за зростанням. Визначаємо певну кількість символів абетки  $B = \{b_k\}$ , де  $k$  — довжина абетки. Відсортований ряд розбиваємо на інтервали відповідно до кількості символів абетки, і кожному з інтервалів призначаємо свій символ. Тобто замість числового ряду  $\Delta y(i)$  отримаємо символний аналог ряду спостережень  $\langle e_i \rangle$ .

Потім підрахуємо кількість однакових ланцюжків  $\langle e_i e_{i+1} \rangle$ ;  $\langle e_i e_{i+1} e_{i+2} \rangle$ ;  $\langle e_i e_{i+1} e_{i+2} e_{i+3} \rangle$  і т.д. символів, а далі — всі ланцюжки по два, три, чотири і т.д. символів. Частота появлень того чи іншого ланцюжка показує ймовірність повторення тих чи інших послідовностей. Таким чином ми перевіряємо чи є в числовій послідовності подібні траєкторії.

У послідовності  $e_i$  проаналізуємо частоту існування пар символів  $\langle e_i e_{i+1} \rangle$  і побудуємо таблицю ймовірностей виникнення символу  $e_{i+1}$   $P(e_{i+1} | e_i)$ ,  $i = \overline{1, N-1}$ .

Далі у послідовності  $e_i$  аналізуємо частоту появи трійок  $\langle e_{i-1} e_i e_{i+1} \rangle$  і будуємо таблицю ймовірностей  $P(e_{i+1} | e_i, e_{i-1})$ ,  $i = \overline{1, N-2}$ . У загальному випадку аналізуємо частоту існування ланцюжків  $P(e_{i+1} | e_i, \dots, e_{i+n})$ . Тобто обчислюємо ймовірність появи символу  $e_{i+1}$  за умови, що попередніми символами є  $e_i, \dots, e_{i+n}$ .

За допомогою обчислених ймовірностей можемо зробити ймовірнісний прогноз виникнення символу  $e_i$  за умови, що відомі ланцюжки попередніх символів  $e_i, e_{i-1}, \dots, e_{i-k}$ . Прогноз подається у вигляді спектру ймовірностей.

Під час практичної реалізації треба обирати ймовірності, значення яких не менше заздалегідь визначеного граничного значення  $P_{ГР}$ .  $P(e_{i+1}|e_i, \dots, e_{i+n}) \geq P_{ГР}$ . Це значення може бути, наприклад, 0,5.

З використанням запропонованого підходу було обраховано зсувні процеси Центральної Лівадійської зсувної системи (рис. 3). За допомогою інформаційно-аналітичної системи на базі програми LandSlip2d [11], яка дозволяє проводити математичне моделювання напружено-деформованого стану зсувних масивів в площинній постановці, а також визначати зсувний тиск і силу протидії, було отримано необхідні для розрахунків значення [9, 10].

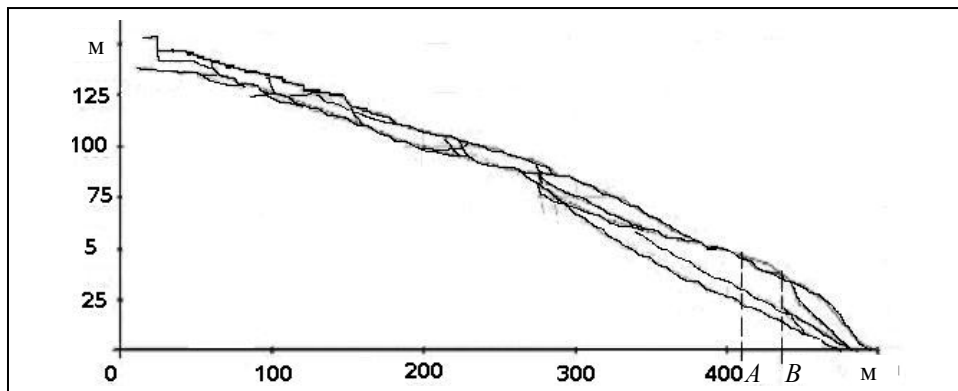


Рис. 3. Фрагмент активної частини зсуву Центральної Лівадійської зсувної системи

Вхідні дані для розрахунку коефіцієнта стійкості і величини зсувного тиску: геологічний розріз схилу із заданими фізико-механічними характеристиками ґрунтів у зонах можливого зсуву, навантаження на схилі від існуючих і проектних споруджень, прогнозовані рівні підземних вод, місце установки утримуючого спорудження та ін.

Одним із найбільш важливих та трудомістких етапів розрахунку напруженої деформації стану зсуву є завдання ймовірних поверхонь ковзання, тобто тієї кривої, по якій буде проходити зсув ґрунтових мас. У залежності від вибору поверхні ковзання, можемо отримати кардинально відмінний результат за розрахунками одного і того ж зсувного схилу. Тобто замість зсувної небезпеки сходу ґрунту при неправильному завданні поверхні ковзання можемо отримати стійкий зсувний схил. Тому підхід, описаний вище, дозволяє виключити такі ситуації за рахунок автоматизованого вибору всіх можливих, подібних до початкової, поверхонь ковзання, а також їх подальшого розрахунку за допомогою нової версії програми LandSlip2d–LandSlip-neighbor2d [12].

За допомогою наведеного алгоритму було визначено можливі траєкторії зсувів. Алгоритм структурного підходу застосовано наступним чином. За числовими даними інтервалу, отриманими інформаційно-аналітичною системою на базі програми LandSlip-neighbor2d, обчислено різниці між сусідніми значеннями ряду. Дані розбито на відповідну кількість груп, одержано символічний аналог ряду. Далі проведено пошук ланцюжків, які повторюються, і таким чином було набрано статистику повторень символів в залежності від попередніх значень. Наприкінці отримано найбільш ймовірні трає-

кторії ковзання. Запропонований підхід формалізовано у вигляді нової версії програми LandSlip-neighbor2d. Приклад його реалізації наведено на рис. 4, де збільшене зображення відрізка  $AB$  (див. рис. 3)  $K_1 - K_4$  — поверхні ковзання, отримані в процесі розрахунків екстремалі за допомогою структурного методу;  $K_y$  — поверхня ковзання, знайдена при інженерно-геологічних пошуках.

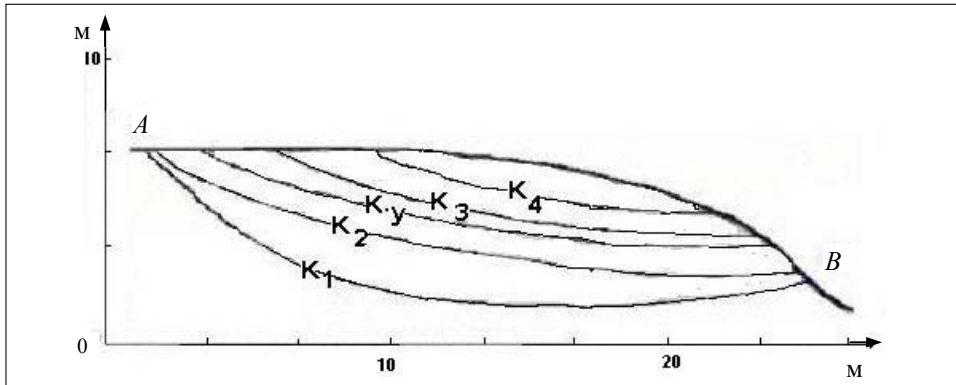


Рис. 4. Знайдені поверхні ковзання

Отримані результати було підтверджено натурними вимірами. Практична перевірка розрахункових формул за алгоритмом показала, що вони дають достатньо задовільне співпадання результатів із даними натурних вимірів. Розходження не перевищили 15%.

## ВИСНОВКИ

1. Для отримання прогнозних значень часових рядів екологічної природи можливе застосування структурних підходів.

2. Переваги цього методу:

- можливість застосовувати його до рядів будь-якої природи як лінійних, так і нелінійних;
- невимогливість до апаратної частини системи прогнозування;
- здатність методу при моделюванні процесу відтворити його природу, тобто відсутність нав'язування будь-якої структури з боку моделі;
- відсутність методичних похибок та можливість виконання середньострокового прогнозу;
- придатність для прогнозування в реальному часі.

3. Метод не вимагає знання статистичних чи будь-яких інших характеристик процесу. Остання перевага є значною при проектуванні та розробці комплексної системи прогнозування в системах підтримки прийняття екологічних рішень.

4. Отримані результати моделювання ймовірних поверхонь ковзання зсувів вказують на можливість застосування зазначеного підходу до моделювання геологічних процесів, актуальність яких останнім часом зросла у зв'язку з активною забудовою зсувних ділянок у багатьох містах України.

5. Розроблена технічна реалізація підходу, яку формалізовано у вигляді нової версії програми LandSlip-neighbor2d, показала високу ефективність автоматизованого вибору можливих, подібних до початкової, поверхонь ковзання зсувонебезпечних схилів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Tsaparas P. Nearest neighbor search in multidimensional space. — Toronto: University of Toronto, 1999. — 50 p.
2. Баклан І.В., Селін Ю.М. Структурний підхід до аналізу та моделювання часових рядів // Вестник Херсонського національного техніч. ун-та. Вып. 2 (22). — Херсон: ХНТУ, 2005. — С. 27–31.
3. Фу К. Структурные методы в распознавании образов. — М.: Мир, 1977. — 319 с.
4. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеоздат, 1985. — 272 с.
5. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. — М.: Наука, 1982. — 320 с.
6. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. — М.: Мир, 1990. — Т.1. — 384 с. — Т.2. — 392 с.
7. Гладкий А.В., Скопецкий В.В. Методи числового моделювання екологічних процесів. — Київ: ІВЦ «Видавництво “Політехніка”», 2005. — 152 с.
8. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеоздат, 1975. — 443 с.
9. Математичне моделювання схилових процесів за допомогою програмного комплексу «схил» / В.В. Полевецький, Ю.М. Селін, Т.Ю. Калюх, А.П. Сиренко // Будівельні конструкції. Міжвідомчий наук.-техніч. зб. — Вип. 63. — 2005. — С. 201–203.
10. Анализ устойчивости оползневого склона ниже Ливадийского дворца при обводнении / Селін Ю.Н., Калюх Т.Ю., Сиренко А.П. и др. // Будівельні конструкції. Міжвідомчий наук.-техніч. зб. — Вип. 63. — 2005. — С. 248–256.
11. Дударенко О.О., Калюх Ю.І., Рижий М.М. Програмний комплекс «Автоматизоване робоче місце для розрахунку зсувонебезпечних схилів: визначення зсувного тиску та коефіцієнту стійкості для різних властивостей ґрунту, сейсмічних та гідрогеологічних умов». Свідоцтво про державну реєстрацію прав автора на твір № ПА 2214 від 20.08.1999р.
12. Селін Ю.М., Калюх Ю.І. Программа для системы поддержки принятия решений относительно действий в зонах возможного смещения оползнеопасных склонов. Определение оползневого давления и коэффициента устойчивости для различных свойств грунта, сейсмических и гидрогеологических условий, построения возможных подобных траекторий смещения. — LandSlip-neighbor2d. Свідоцтво про державну реєстрацію прав автора на твір № 16683 від 30.03.2006 р.

Надійшла 27.01.2006