

ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА

УДК 550.3 (519.21)

З. Вижва, д-р фіз.-мат. наук, доц.,
E-mail: zoya_vyzhva@ukr.net

В. Демидов, канд. фіз.-мат. наук, асист., E-mail: fondadl@ukr.net

А. Вижва, асп., E-mail: motomustanger@ukr.net

Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Геологічний факультет, вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ГУСТИНИ КРЕЙДЯНОЇ ТОВЩІ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО НА ПРОММАЙДАНЧИКУ РІВНЕНСЬКОЇ АЕС ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МОДЕЛІ КОШІ

(Рекомендовано членом редакційної колегії канд. геол. наук О.І. Меньшовим)

Робота присвячена подальшій розробці теорії та методів статистичного моделювання (методів Монте-Карло) випадкових процесів та полів на основі їх спектральних розкладів, а також застосуванню таких методів до розв'язання актуальних задач геофізичного моніторингу довкілля. Для даних дослідження густини товщі крейдяних відкладів на території проммайданчика Рівненської АЕС розроблено нову ефективну методику чисельного моделювання випадкових 3D полів. Розглянуто задачу статистичного моделювання реалізацій випадкового поля "шуму" для даних густини крейдяної товщі у тривимірному просторі.

Із 3D даних густини крейдяної товщі було виділено 2D дані на трьох рівнях глибини залягання порід (28, 29, 30 м від поверхні). На кожному рівні дані було представлено у вигляді суми детермінованої та випадкової складових. Детермінована 2D трендова поверхня була побудована за допомогою сплайнової інтерполяції. Випадкова складова (так званий "шум") – це однорідне ізотропне 2D випадкове поле.

Сформульовано алгоритм для генерування реалізацій випадкового поля "шуму" для даних густини крейдяної товщі із кореляційною функцією типу Коші на основі оцінки середньоквадратичної апроксимації випадкових полів, що розглядаються. Сконструйовано статистичну модель для гауссівських однорідних та ізотропних випадкових полів у тривимірному просторі, які задано своїми статистичними характеристиками.

На основі підібраної статистичної моделі та розробленого алгоритму побудовано оригінальну програму Spectr 3 для чисельного моделювання реалізацій значень даних у тривимірному випадку. Додатково змодельовано 300 зімітованих значень даних густини крейдяної товщі в проміжках між точками спостережень для кожного рівня. Проведено ефективне порівняння точності моделювання запропонованого методу та методу TBM (turning band method).

Впроваджено метод статистичного моделювання реалізацій випадкових 3D полів на основі спектральних розкладів у вирішенні проблем кондиційності карт шляхом доповнення даних густини крейдяної товщі до необхідної детальності. Розроблено універсальний метод чисельного моделювання геофізичних даних, який дає можливість вирішити проблеми генерування реалізацій випадкових полів у тривимірному просторі на сітці необхідної детальності та регулярності.

Ключові слова: геофізичний моніторинг природних процесів, крейдяні породи, статистичне моделювання.

Вступ. У геофізиці більшість результатів досліджень отримують у цифровому вигляді, зокрема і дані в тривимірному просторі (в просторі 3D), які представляють собою вимірювання геофізичних показників, що спостерігаються, в залежності від трьох просторових координат, або від часу та двох просторових координат. Проте, на практиці точність отриманих даних залежить від різних випадкових впливів, які необхідно враховувати при обробці цих даних. Крім того, виникає проблема кондиційності карт, коли дані для їх побудови неможливо отримати у всій повноті або із потрібною детальністю на деяких ділянках області дослідження. Тоді в таких ситуаціях для доповнення результатів вимірювань даними, яких не вистачає, часто

рекомендується застосовувати методи статистичного моделювання (методи Монте-Карло) реалізацій випадкових процесів та випадкових функцій у багатовимірному просторі (випадкових полів) [1-8].

Об'єкт дослідження та методика застосування статистичного моделювання до 3D даних спостережень. У роботі об'єктом дослідження є просторові дані моніторингових спостережень на території розташування РАЕС. Проводився комплекс геофізичних досліджень, серед яких використовувались сейсморозвідка КМЗХ (1983-1984 рр), електророзвідка ВЕЗ (1978-1979 рр), міжсвердловинне прозвучування (1983 р), радіоактивний каротаж (1982-1983 рр), резистивиметрія в свердловинах (1982 р) та ін.

Серед моніторингових спостережень найбільший інтерес представляють радіоізотопні дослідження густини та вологості ґрунтів по периметру збудованих споруд за період 1984-2002 рр. Густина ґрунтів визначали методами гамма-гамма каротажу, вологість ґрунтів – методом нейтрон-нейтронного каротажу. Саме результати останніх двох методів є найбільш цікавими з точки зору наявності тривалих 3D спостережень за зміною параметрів.

Виникає проблема доповнення моделюванням даних, які отримані протягом 1984-2002 років при контролі зміни густини крейдиної товщі на території досліджуваного проммайданчика з використанням радіоізотопних методів по сітці, що включала 29 свердловин. У роботі це питання запропоновано вирішувати методом статистичного моделювання 3D випадкових полів.

Даними досліджень є масив радіоізотопних досліджень густини порід по периметру збудованих споруд за період 1984-2002 рр, який отримано у 29 свердловинах. Для аналізу використовувалися спостереження по низці свердловин, які відкрили крейдиану товщу на деяких рівнях глибин. Із даних густини порід $\eta(x,y,z)$, які подані в 3D вигляді, було виділено 2D дані на фіксованих площинах $Z_0, Z_1, \dots, Z_i$, де Z_i – це глибина залягання крейдианих відкладів на i -му рівні. Таким чином, моделювання зводиться від 3D масиву до 2D, але при цьому набір фіксованих площин дає можливість відтворити тримірне зображення середовища, що моделюється.

У процесі побудови карт за даними густини крейдиної товщі на кожній із площин i -го рівня було виділено детерміновані та випадкові складові. При цьому, детерміновану функцію можна підбирати шляхом наближення різними методами. Ця процедура називається виділенням тренда для даних площини. В нашій роботі по кожній із поверхонь $Z_0, Z_1, \dots, Z_i$ значень густини крейдиної товщі $\eta(x,y,z_i)$ плоскої області i -го рівня за допомогою сплайнової інтерполяції була побудована детермінована трендова поверхня $f(x,y,z_i)$. Для цього використовувалось середовище MathCad.

На наступному етапі роботи було обчислено різниці між поверхнями вхідних даних $\eta(x,y,z_i)$ (значень густини порід) та трендовими поверхнями $f(x,y,z_i)$ для кожного i -го рівня (Z_i – фіксоване). Значення таких різниць утворюють випадкове поле відхилень $\xi(x,y,z_i)$ на i -й площині. Після такої операції вхідні дані кожного i -го рівня можна подати у вигляді суми однорідної ізотропної випадкової складової $\xi(x,y,z_i)$ (так званий "шум"- випадкове поле) та тренда $f(x,y,z_i)$ – детермінованої функції, тобто суми:

$$\eta(x,y,z_i) = f(x,y,z_i) + \xi(x,y,z_i). \quad (1)$$

У результаті задача звелась до такої, коли на трендовий каркас, побудований на сітці більшої детальності, ніж сітка реальних спостережень, необхідно накласти додаткові змодельовані значення випадкового поля "шуму", які можна отримати розробленим авторами методом чисельного моделювання 3D випадкових полів.

У роботі запропоновано використовувати для цього метод статистичного моделювання 3D випадкових полів $\xi(x,y,z_i)$ на основі їх спектрального розкладу [1, 6], який дає можливість за окремими отриманими значеннями їх реалізацій знайти досконале зображення таких полів у всій області спостережень. При цьому такі випадкові поля "шуму" мають бути однорідними та ізотропними.

Для того, щоби побудувати модель та алгоритм статистичного моделювання значень реалізацій "шуму", необхідно перед цим провести статистичний аналіз даних досліджень густини порід.

Якщо в результаті перевірки щільність розподілу даних буде мати наближено гауссівський розподіл, то потрібно застосовувати вказаний метод чисельного моделювання із використанням нормально розподілених випадкових величин. Такий алгоритм розроблено в статті [3]. За допомогою нього можна генерувати на комп'ютері реалізації 3D даних відповідно до підібраної моделі.

Також було проведено моделювання реалізацій параметрів дослідження методом TBM (turning band method) [7, 8] для генерування реалізацій двовимірних випадкових полів. Основною ідеєю такого методу є зведення двовимірного моделювання до одновимірного вздовж прямої лінії, яка обертається на площині. Замість прямого моделювання 2D поля в методі TBM моделюються його значення вздовж прямої в просторі. При цьому, зважена сума відповідних значень прямої процесів визначена в кожній точці області площини. Для такого метода вводиться базове рівняння, яке регулює перетворення двовимірної кореляційної функції в одновимірну.

Важливим завданням цієї статті було також здійснити порівняльний аналіз результатів точності генерування реалізацій випадкових полів методом TBM та методом, розробленим у [3].

Основні етапи чисельного моделювання при вирішенні задачі та результати.

При обробці даних моніторингових спостережень за зміною густини крейдиної товщі на території досліджуваного проммайданчика на території розташування РАЕС з використанням радіоізотопних методів по сітці, що включала 29 свердловин, була вирішена проблема доповнення даних на більш детальній сітці шляхом чисельного моделювання.

На попередньому підготовчому етапі моделювання проводилась статистична обробка даних, які описано вище, із врахуванням характеру їх розташування в тривимірному просторі. Для визначення розподілу вхідних даних було побудовано для них гістограму (рис. 1). Встановлено, що дані мають наближено гауссівський розподіл.

На наступному етапі підбиралась статистична модель кореляції густини крейдиної товщі в тривимірному просторі, для чого визначено її варіограму та відповідну їй кореляційну функцію за допомогою пакету програм GEO-R (рис. 2). Моделювання проводилось по трьох рівнях (28, 29, 30 м від поверхні). Встановлено, що найбільш адекватно описували наші вхідні дані два типи кореляційної функції, а саме: функція Бесселя (2) [3] та функція Коші (3):

$$B(\rho) = 3\sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{J_3(a\rho)}{(a\rho)^2}, \quad a = 1, 5; \quad (2)$$

$$B(\rho) = \left(1 + \frac{\rho^2}{a^2}\right)^{-1}, \quad a = 1, 5. \quad (3)$$

На рис. 2 наведено графіки емпіричної (зображена хрестиками) та теоретичної (зображена точковим графіком) варіограм, побудованих за даними досліджень. Такий теоретичний варіограм відповідає кореляційна функція типу Коші (3) при значенні параметра $a = 1, 5$.

Спектральна щільність у тривимірному просторі для такої кореляційної функції типу Коші буде мати вигляд:

$$\Phi'(u) = a^2 u \exp\{-a u\} \quad (4)$$

Наведена спектральна щільність використовується у побудованому і вказаному нижче алгоритмі статистичного моделювання значень реалізацій "шуму" для даних густини крейдиної товщі.

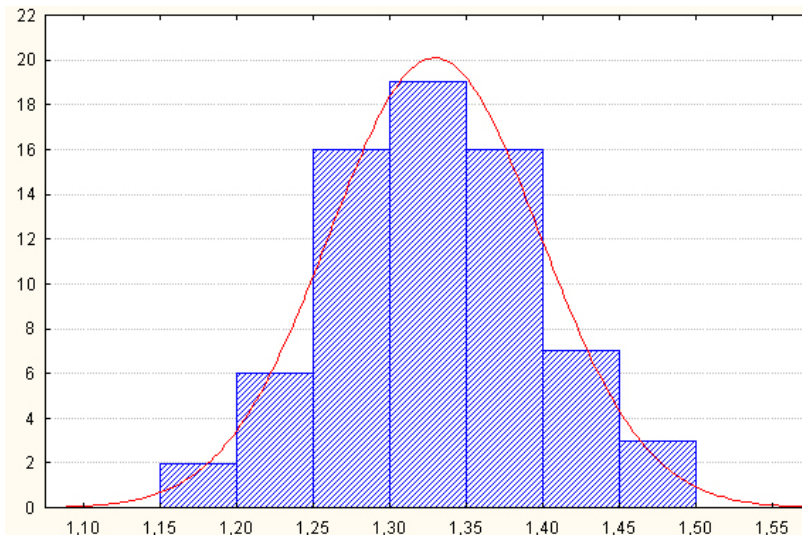


Рис. 1. Гістограма густини крейдяної товщі (осереднені 3D дані за 1984-2002 рр):
1 – кількість спостережень на кожному інтервалі густини; 2 – теоретична гауссівська крива

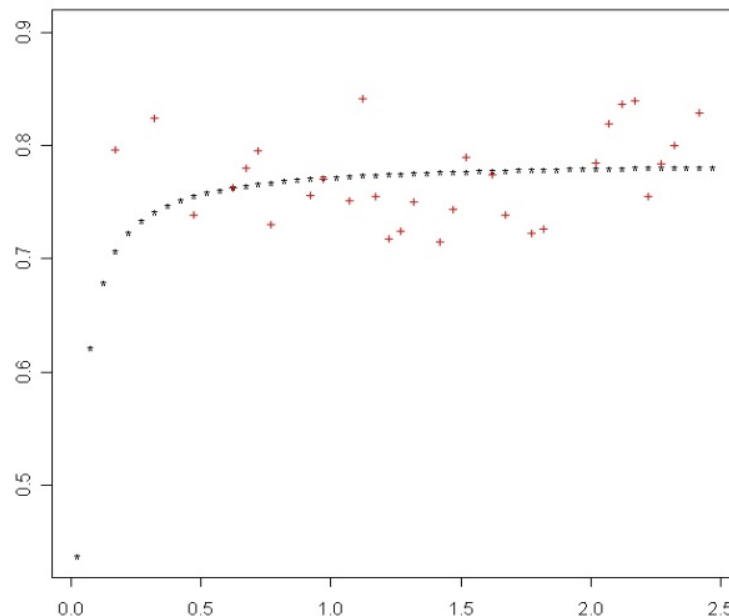


Рис. 2. Варіограми (емпірична та теоретична) для вхідних даних по крейдяній товщі,

яка відповідає кореляційній функції типу Коші $B(\rho) = \left(1 + \frac{\rho^2}{a^2}\right)^{-1}$, $a > 0$.

Для генерування реалізацій "шуму" даних досліджень була підібрана модель [1, с. 195] однорідного ізотропного випадкового поля $\xi(r, \theta, \phi)$ (r, θ, ϕ – сфери-

чні координати точки (x, y, z)) у тривимірному просторі, яка представлена наступною частковою сумою:

$$\xi_N(r, \theta, \phi) = \sum_{m=0}^N \frac{J_{\frac{m+1}{2}}(\zeta r)}{\sqrt{\zeta} r} \sum_{l=0}^m C_{m,l} P'_m(\cos \theta) [\cos l\phi \eta'_{m,1} + \sin l\phi \eta'_{m,2}], \quad (5)$$

де $\{\eta'_{m,l}\}$, $m=0,1,2,\dots$, $l=0,1,\dots,m$, $i=1,2$ – послідовності взаємно незалежних випадкових величин таких, що $M \eta'_{m,l} \eta'_{k,s} = \delta_m^k \delta_l^s \delta_i^j$, δ_i^j – символ Кронекера, а ζ – незалежна від $\eta'_{m,l}$ і $\eta''_{m,l}$ ($m=0,1,2,\dots$, $l=0,1,\dots,m$) випадкова величина із спектральною функцією $\Phi(\lambda)$, коефіцієнти $C_{m,l}$ можна визначити за виразом

$$C_{m,l} = \sqrt{\nu_l (2m+1) \frac{(m-l)!}{(m+l)!}}, \text{ де } \nu_l = \begin{cases} 1, & k=0; \\ 2, & k>0, \end{cases} P'_m(z) - \text{при-}$$

єднані функції Лежандра, $J_m(z)$ – функція Бесселя першого роду m -го порядку.

Для моделювання випадкової величини ζ із спектральною функцією $\Phi(\lambda)$ та відповідною спектральною щільністю (3) скористаємось розробленим в [4] методом статистичного моделювання випадкових величин із гамма-розподілом при цілочисельному значенні параметра.

Нагадаємо, що випадкова величина ζ має гамма-розподіл із параметром ν , якщо її щільність розподілу такого вигляду:

$$f(u) = u^{\nu-1} \exp\{-u\} / \Gamma(\nu).$$

Якщо параметр v – цілочисельний та $v=2$, то щільність розподілу буде:

$$f_a(u) = au \exp\{-au\}. \quad (6)$$

Тоді випадкову величину ζ із такою щільністю розподілу (6) можна змодельовати [4] за формулою:

$$\zeta = -\frac{1}{a} \ln(\alpha_1 \alpha_2), \quad (7)$$

де α_1, α_2 – незалежні рівномірно розподілені випадкові величини.

Позначимо моменти через:

$$\mu_i = \int_0^\infty \lambda^i d\Phi(\lambda), i \in \mathbb{Z}_+. \quad (8)$$

Для того, щоб визначити похибку середньоквадратичного наближення об'єкта моделювання частковою сумою (5), необхідно скористатись оцінкою такого наближення, яку сформульовано в наступному твердженні [5]:

Теорема. Якщо $\mu_3 < +\infty$, то для всіх $N = 1, 2, \dots$ має місце нерівність:

$$M|\xi(r, \theta, \phi) - \xi_N(r, \theta, \phi)|^2 \leq \frac{5\mu_3}{4N^2}. \quad (9)$$

На основі моделі (5) та нерівності (9) згенеровано реалізації тривимірного випадкового поля із кореляційною функцією типу Коші виду (3) при значенні параметра $a=1,5$.

Для моделювання реалізацій гауссівського тривимірного однорідного ізотропного випадкового поля із такою кореляційною функцією використовувався наступний, запропонований у роботі [1], **алгоритм**:

1. Змодельовати випадкову величину ζ із щільністю розподілу (6) за виразом (7).

2. Визначити відповідне для заданої точності наближення $\varepsilon > 0$ значення числа доданків N ряду за допомогою нерівності: $\frac{5\mu_3}{4N^2} \leq \varepsilon$, де $\mu_i, i \in \mathbb{Z}_+$ обчислюється за формулою (8).

3. Змодельовати набори незалежних стандартних гауссівських випадкових величин $\{\eta_{m,1}^i, \eta_{m,2}^i\}$ ($m = 0, 1, 2, \dots, l = 0, 1, \dots, m$) із статистичними характеристиками: $M\eta_{m,1}^i = M\eta_{m,2}^i = 0$, $M\eta_{m,1}^i \eta_{k,s}^j = \delta_m^k \delta_l^s \delta_i^j$ –

символ Кронеккера.

4. Обчислити, при підстановці значень величин, обчислених за пунктами 1, 2 та змодельованих гауссівських випадкових величин за пунктом 3, значення реалізації випадкового поля $\xi(\vec{x})$ у заданій фіксованій точці (r, θ, ϕ) за формулою (5).

5. Знайти статистичну оцінку для кореляційної функції по отриманій реалізації випадкового поля $\xi(r, \theta, \phi)$ і порівняти із заданою (підбіраною для даних спостережень) кореляційною функцією $B(\rho)$, а також провести статистичний аналіз цієї реалізації на адекватність.

На основі підбіраної моделі (5) та наведеного алгоритму розроблено оригінальну програму Spectr 3 у середовищі Delphi 12.0 для чисельного моделювання реалізацій значень даних у тривимірному випадку.

За допомогою цієї програми згенеровано реалізації випадкового поля "шуму" для даних густини крейдяної товщі в тривимірному просторі із кореляційною функцією типу Коші (3) при значенні параметра $a=1,5$. Потрібно зауважити, що при моделюванні дані по рокам для кожної свердловини було усереднено.

Для моделі (5), яка використовувалась авторами для генерування реалізацій досліджуваного поля в фіксованій точці тривимірного простору, обчислення Бесселевих функцій та функцій Лежандра здійснювалось за допомогою оригінальної програми та перевірялися пакетом програм Mathematika.

Результати, які було отримано моделюванням за наведеним в параграфі алгоритмом, зображені на рис. 3. На рис. 3 (а) та на рис. 3 (б) наведено приклад побудови карти густини крейдяної товщі за даними спостережених свердловин (дані усереднені за всі роки по 29 свердловинах на рівні 28 та 30 м відповідно) за допомогою програми Surfer 10. Детальність цієї побудови за наявними даними не може забезпечити надійну характеристику стану крейдяної товщі, оскільки такої кількості результатів вимірювань для цього недостатньо.

На рис. 3 (в) и рис. 3 (г) наведено ізолінії рівних значень густини крейдяної товщі, що побудовані на основі змодельованих даних із урахуванням значень в режимних свердловинах (на рівні 28 та 30 м відповідно).

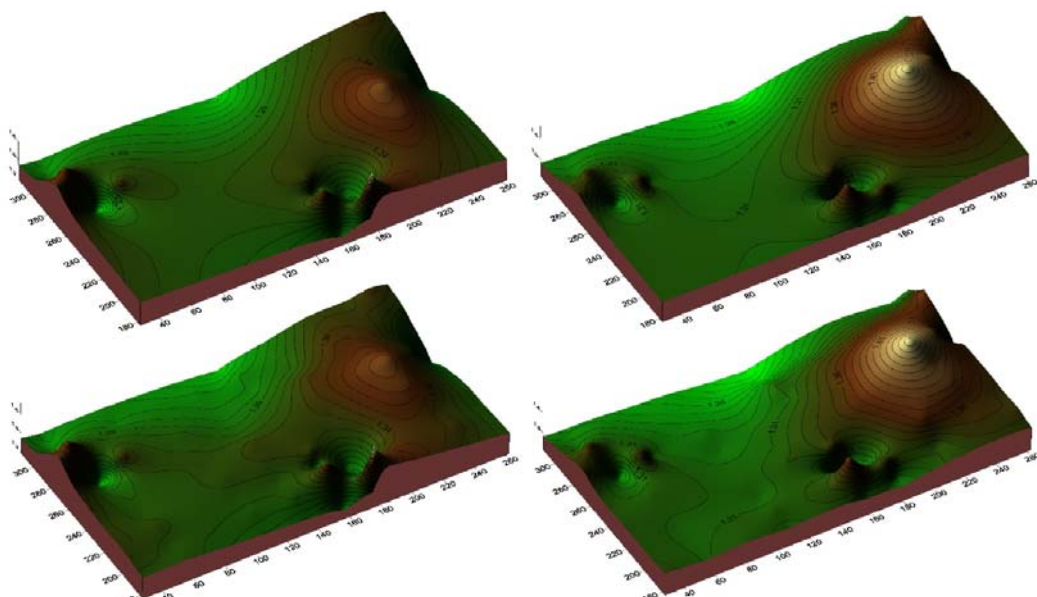


Рис. 3. Розподіл густини крейдяної товщі на проммайданчику Рівненської АЕС на глибинах 28 м (а) та 30 м (б) від поверхні, по усередненим спостереженням в 29 свердловинах за 1984-2004 рр (а), та по змодельованим даним із урахуванням значень в режимних свердловинах на глибинах 28 м (в) та 30 м (г)

Додатково отримані дані (змодельовано додатково 300 значень у проміжках між точками спостережень для кожного рівня) дозволяють мати більш надійну апроксимацію, що дає можливість більш обґрунтовано приймати рішення про стан крейдяної товщі на території розташування РАЕС та визначати місця для перевірки та проведення більш детальних досліджень.

Для порівняння адекватності моделювання методом, розробленим авторами в цій роботі на основі спе-

ктрального розкладу однорідного ізотропного випадкового поля у тривимірному просторі, та адекватності моделювання методом ТБМ було також згенеровано реалізації 3D випадкового поля із кореляційною функцією типу Коші (3) методом ТБМ. Побудовано варіограми для таких реалізацій (рис. 4), та для реалізацій, отриманих нашим методом (рис. 5).

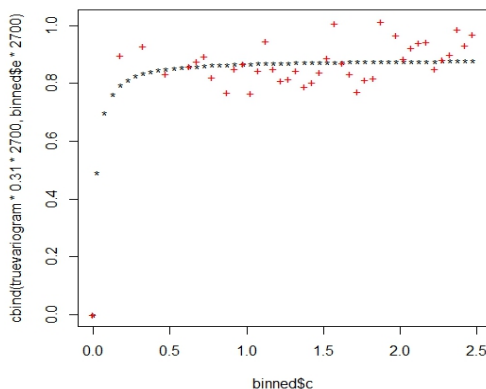


Рис. 4. Варіограми (емпірична та теоретична) згенерованих нашим методом реалізацій по крейдяній товщі з кореляційною функцією типу Коші

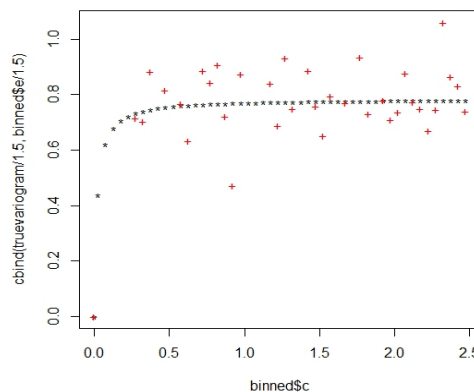


Рис. 5. Варіограми (емпірична та теоретична) згенерованих методом ТБМ реалізацій по крейдяній товщі з кореляційною функцією типу Коші

Порівняльний аналіз варіограм показав, що середньоквадратичне відхилення емпіричної варіограми (зображена хрестиками) та теоретичної (зображена точковим графіком) для розробленого авторами методу дорівнює 0,002816, а для методу ТБМ – 0,009325. Тобто, можна зробити висновок, що розроблений метод статистичного моделювання однорідних ізотропних випадкових полів у тривимірному просторі має точність майже в три рази вищу, ніж точність методу ТБМ.

Висновки. Запропонований метод статистичного моделювання реалізацій 3D випадкових полів на основі спектрального розкладу таких полів дає можливість доповнювати дані спостережень із заданою деталісттю. Цей метод не містить труднощів у зв'язку з необхідністю обчислення спектральних коефіцієнтів, як це виникає в запропонованому в роботах [2, 3] методі, а також не потрібно для нього проводити перетворення багатовимірної кореляційної функції в одновимірну, як це необхідно при застосуванні методу ТБМ [6, 7, 8]. При цьому, точність моделювання запропонованого методу майже в три рази вища, ніж точність методу ТБМ.

Результати застосування такого методу дозволяють зробити припущення про перспективу його використання для доповнення бази даних відсутніми в місцях пропусків даними, а також для виявлення аномальних областей та інших геофізичних задач. Отже, сфера застосування запропонованого методу не обмежується областю вирішеної в статті задачі.

Список використаних джерел

1. Вижва З.О., (2011). Статистичне моделювання випадкових процесів та полів. К.: Обрії, 388 с.
2. Vyzhva Z. O., (2011). The statistical simulation of random processes and fields. Kyiv: Obrii, 388 p.
3. Вижва С.А., Вижва З.О., Демидов В.К., (2004). Статистичне моделювання карстово-суфозійних процесів на території потенційно небезпечних об'єктів // Геоінформатика. №2, 78-85.
4. Vyzhva A.S., Vyzhva Z. O, Demidov V. K., (2004). The statistical simulation of karst-suffusion phenomenon on the territory of potential – dangerous objects // Geoinformatics. №2, 78-85.
5. Вижва С.А., Вижва З.О., Демидов В.К., (2006). Статистичне моделювання тривимірних полів у задачах геофізичного моніторингу геологічного середовища // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики: 36. наук. праць. – Київ, 173-185.
6. Vyzhva A.S., Vyzhva Z. O, Demidov V. K., (2006). The statistical simulation of three-dimensional random fields on the problems of geological environment monitoring // Theoretical and applying aspects of Geoinformatics. Zb. Nauk. Prats. Kyiv, 173-185.
7. Ермаков С.М., Михайлов Г.А., (1982). Статистическое моделирование. М., Наука, 296 с.
8. Yermakov S.M., Mikhailov G.A., (1982). The Statistical Simulation, M.: Nauka, 296 c.
9. Ядренко М.Й., Гамалий О.Г., (1998). Статистичне моделювання однорідних та ізотропних тривимірних випадкових полів та оцінки похибок моделювання // Теор. ім. та мат. стат., №59, С. 171-175.
10. Yadrenko M.I., Gamaliy O.G., (1998). The statistical simulation of 3-D homogeneous and isotropic random fields and estimates of the modeling error // Theor. Probability and Math. Statist., No. 59, 171- 175.
11. Chiles J.P., Delfiner P., (2009). Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty / John Wiley & Sons, Inc. New York, Toronto, 720 p.
12. Mantoglov A., Wilson John L., (1981). Simulation of random fields with turning bands method // "MIT Ralph M.Parsons Lab. Hydrol. And Water Syst. Rept", N 264, 199 p.
13. Gneiting T., (1997). Symmetric Positive Definite Functions with Applications in Spatial Statistics. / Von der Universität Bayeuth zur Erlangung des Grades eines Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.) genehmigte Abhandlung, 107 p.

Надійшла до редколегії 22.05.14

Z. Vyzhva, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Assos. Prof. E-mail: zoya_vyzhva@ukr.net
V. Demidov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assistant E-mail: fondadl@ukr.net
A. Vyzhva, Postgraduate Student E-mail: motomustanger@ukr.net
Geological Faculty, Taras Shevchenko National University of Kyiv
90, Vasylykivska Str., Kyiv, 03022 Ukraine

MONTE CARLO METHOD AND CAUCHY MODEL: IDENTIFYING CHALK LAYER DENSITY ON RIVNE NPP INDUSTRIAL AREA

The paper furthers the theory and methods of random process and field statistical simulation (Monte Carlo methods) based on spectral decomposition, and focuses on the application of the methods mentioned to environmental geophysical monitoring.

A new effective statistical technique has been devised to simulate random fields in 3D space for chalk layer density on the Rivne NPP industrial site. There has been solved the problem of statistical simulation of "noise" for chalk layer density realizations as random fields in 3D space.

2D data were selected from 3D data on chalk layer density at three depth levels (28, 29, 30 m below the surface). The data were presented as the sum of deterministic and random components for each level. Deterministic 2D trend surface was constructed using spline interpolation. The random component ("noise" factor) is a 2D homogeneous isotropic random field.

There has been formulated an algorithm to generate "noise" field realization for chalk layer density involving Cauchy correlation function, which has been devised on the mean-square approximation of random fields' estimator. There has been made a statistical model for Gaussian homogeneous and isotropic random fields in three-dimensional space, which were given by their statistical characteristics.

There has been made Spectr 3 program based on the chosen statistical model and the formulated algorithm for statistical simulation of 3D random fields' realizations. Additionally simulated have been 300 values in the intervals between observation points for each level. The effective comparison of error simulation between the method proposed and TBM (turning band method) has been made.

There has been introduced a method of random processes and fields in 3D space statistical simulation based on spectral decompositions in order to enhance map accuracy by the example of chalk layer density data. There has been developed a universal method of statistical simulation of geophysical data for generating random 3D fields' realizations on grids with required accuracy and regularity.

Key words: environmental geophysical monitoring, chalk layer, statistical model.

З. Выжва, д-р физ.-мат. наук, доц., zoya_vyzhva@ukr.net

В. Демидов, канд. физ.-мат. наук, ассистент, fondadl@ukr.net

А. Выжва, асп., motomustanger@ukr.net

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

Геологический факультет, ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ МЕЛОВОЙ ТОЛЩИ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО НА ПРОМПЛОЩАДКЕ РОВЕНСКОЙ АЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛИ КОШИ

Работа посвящена разработке теории и методов статистического моделирования моделирования (методов Монте-Карло) случайных процессов и полей на основе их спектральных разложений, а также применению таких методов к решению актуальных задач геофизического мониторинга окружающей среды. Для данных исследования плотности толщи меловых отложений на территории промплощадки Ровенской АЭС разработано новую эффективную методику численного моделирования случайных 3D полей. Рассмотрено задачу статистического моделирования реализаций случайного поля "шума" для данных плотности меловой толщи в трёхмерном пространстве.

Из 3D данных плотности меловой толщи было выделено 2D данные на трёх уровнях глубины залегания пород (28, 29, 30 м от поверхности). На каждом уровне данные были представлены в виде суммы детерминированной и случайной составляющих. Детерминированная 2D трендовая поверхность была построена при помощи сплайновой интерполяции. Случайная составляющая (так называемый "шум") – это однородное изотропное 2D случайное поле.

Сформулирован алгоритм для генерирования реализаций случайного поля "шума" для данных плотности меловой толщи с корреляционной функцией типа Коши на основе оценки среднеквадратической аппроксимации рассматриваемых случайных полей. Сконструирована статистическая модель для гауссовских однородных изотропных случайных полей в трёхмерном пространстве, которые заданы своими статистическими характеристиками.

На основе подобранной статистической модели и разработанного алгоритма построено оригинальную программу Spectr 3 для численного моделирования реализаций значений данных в трёхмерном случае. Дополнительно смоделированы 300 симитированных значений данных плотности меловой толщи в промежутках между точками наблюдений для каждого уровня. Проведено эффективное сравнение точности моделирования предложенного метода и метода TBM (turning band method).

Внедрён метод статистического моделирования реализаций случайных 3D полей на основе спектральных разложений в решение проблем кондиционности карт путём дополнения данных плотности меловой толщи до необходимой детальности. Разработан универсальный метод численного геофизических данных, который даёт возможность решить проблемы генерирования реализаций случайных полей в трёхмерном пространстве на сетке необходимой детальности и регулярности.

Ключевые слова: геофизический мониторинг природных процессов, меловые породы, статистическое моделирование.