

УДК: 528.4

Кохан С.С., Поліщук І.П.

ВПЛИВ ПРОСТОРОВИХ СТРУКТУР НА ТОЧНІСТЬ МЕТОДІВ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ

ВСТУП

Картографування властивостей ґрунтів виступає критичною складовою технологій точного землеробства [3]. Кількість точок відбору і вибір методу інтерполяції для перетворення дискретних даних в послідовні поверхні складають найбільш важливі компоненти точного картографування.

Ряд досліджень свідчить, що кількості відібраних зразків належить провідна роль у забезпеченні провідної тенденції відображення властивостей ґрунту зі встановленим рівнем точності [2,3]. Типовим підходом виступає твердження – чим більша кількість зразків, тим вища точність створеної карти. Однак до уваги слід брати витрати коштів на відбір зразків та проведення хімічних аналізів. Тому при виборі оптимальної кількості зразків для картографування властивостей ґрунту доцільно враховувати вартість відбору.

Просторове розміщення точок відбору зразків є надзвичайно важливим для наступних аналізів. Для картографування зразки слід розміщувати рівномірно по всій площі. Можна переглянути повністю регулярну схему відбору, якщо вона співпадає за частотою з регулярним розміщенням зразків у ландшафті. Досить ефективним є рендомізований спосіб відбору для розрахунків непередбачених середніх і варіювань. Поряд з цим повністю рендомізоване розміщення точок відбору має декілька недоліків. По-перше, кожна точка повинна бути розміщена окремо, в той час як регулярна сітка потребує лише первинного місця розташування, орієнтації, простору для позиціонування кожної точки. Це легко забезпечити з використанням GPS. По-друге, повна рендомізація може призвести до нерівномірного розподілу точок, якщо вимірювання проводитимуться в незначній кількості точок, що звичайно виключається з-за високої вартості [1].

На Рис. 1 розглядаються основні способи відбору зразків. Компромісним методом між рендомізованим і регулярним відбором виступає стратифікований рендомізований спосіб, коли точки відбору локалізуються рендомізовано в межах регулярних блоків або шарів. Кластерний (гніздовий) спосіб відбору використовується для оцінки просторового варіювання при наявності кількох різних масштабів. Регулярний трансектний відбір часто використовується для картографування профілю річок, берегових ліній, гірської місцевості. Оцифровка контурних ліній виступає загальноприйнятим методом відбору друкованих карт для створення цифрових моделей рельєфу.

Підтримка. Підтримка – це технічний термін, який використовується в геостатистиці для вираження площі або об'єму фізичного зразка, де проводились вимірювання. Якщо відібраний зразок становить 1 кг ґрунту, тоді підтримка

приблизно становитиме 10 x 10 см за площею і близько 5 см товщиною. Якщо зразок становить 1 л ґрунтових вод, одержаний при відборі з трубки, підтримка враховуватиме розміри даної колонки. Оскільки при виконанні лабораторних аналізів зразки гомогенізують розмелюванням або змішуванням, вся внутрішня структура і варіації втрачаються. Тому всі вимірювання співвідносяться до площі, з якої вони відбирались або до відповідного об'єму.

Коли відібрані зразки одержують за даної підтримки з метою передбачення тих же атрибутивних показників з ділянок, де не проводився відбір зразків, тоді одержані прогнознi результати відносяться до ділянок, які мають аналогічну ж підтримку, хоч визначення об'єму чи просторове усереднення використовуються для співвідношення спостережень до більших площ або об'ємів. Такі заходи відомі під назвою "позамасштабних".

Одним з таких найпростіших заходів є відбір об'єму зразка, який складається з декількох бурових проб, відібраних в межах визначеної площі навколо геометрично визначеної точки і включає гомогенізацію проб перед лабораторним аналізом. Наприклад, якщо 10 бурових проб відібрано і змішано з ділянки розміром 10 x 10 м, підтримкою такого зразка буде квадрат з аналогічними розмірами сторін.

Збільшення підтримки при відборі об'ємних зразків є доцільним, коли просторове варіювання атрибутивних показників, розміщених на незначній відстані настільки велике, що варіювання в межах великих відстаней не можуть бути очевидними в порівнянні з першими.

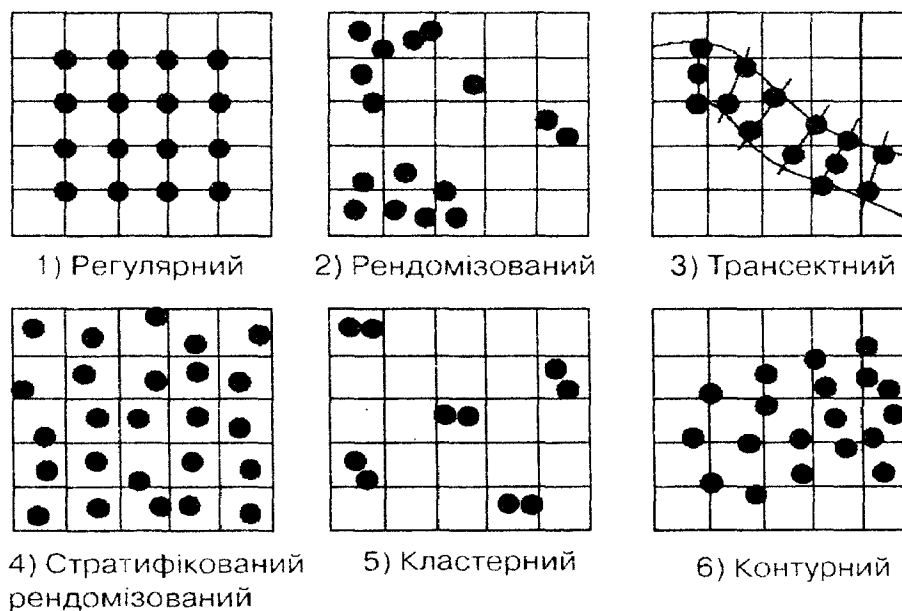


Рис. 1. Способи відбору зразків

Термінологія. Величина атрибутивного показника в точці відбору становить $z(x_i)$, де індекс i вказує на одне із загальної кількості n можливих вимірювань, які географічно співвідносяться до координат x будь-якої декартової системи.

Передбачена величина в точці, в якій не проводився відбір зразків, становить $\hat{z}(x_0)$. Метод інтерполяції, який передбачає величину атрибутивного показника в точці відбору, що ідентична вимірюваному показнику, називають точним. Це спостерігається за ідеальних умов, оскільки лише в точках відбору ми маємо точні характеристики атрибутів. Всі інші методи називають неточними. Статистика різниць між вимірюваними і передбаченими значеннями в точках відбору $\hat{z}(x_i) - z(x_i)$ часто використовується як індикатор якості неточного методу інтерполяції.

МЕТОДИ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ

Методи інтерполяції поділяють на 2 великих групи: методи глобальної інтерполяції і методи локальної інтерполяції. Вони відносно доступні, вимагають лише розуміння простих детерміністичних статистичних методів. Їх часто включаються в комерційні ГІС.

Геостатистичні методи, які використовують методи просторової автокореляції, відомі як “крігінг” і потребують розуміння принципів статистичної просторової автокореляції. Такі методи використовуються, коли варіювання атрибутів є нерегулярним, а щільність відбору зразків така, що прості методи інтерполяції можуть дати нестійкі передбачення. Геостатистичні методи забезпечують імовірну оцінку якості інтерполяції. Але за їх допомогою не здійснюють передбачень для земельних ділянок, розмір яких перевищує підтримку. В цілому методи геостатистики дозволяють інтерполювати індикаторні функції і можуть включати “м’яку” інформацію для проведення інтерполяції, таким чином підвищуючи точність результатів. Деякі ГІС включають прості методи геостатистики, але звичайно вони просторово лімітовані і доцільніше експортувати дані в спеціалізовані програми.

МЕТОД ЗВАЖЕНИХ ВІДСТАНЕЙ

Метод зважених відстаней поєднує в собі ідеї наближення поступові зміни поверхні тренду. Метод передбачає, що величина атрибута z в точці, де не проводився відбір зразка, дорівнює середньозваженій відстані до точок, розташованих безпосередньо близько або в межах певної площі, яка оточує дану точку. Первинні точки розташовуються в межах регулярної сітки або розподіляються нерегулярно в межах певної площі, тому інтерполяція здійснюється в точки щільної регулярної сітки з метою створення карти.

Розрахунок зважених рухомих середніх значень проводиться за формулою:

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot z(x_i); \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

де зважені відстані λ_i подаються за допомогою $\phi(d(x, x_i))$. Найбільш поширеним видом $\phi(d)$ є передбачення за допомогою зважених відстаней:

$$\hat{z}(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n z(x_i) \cdot d_{ij}^{-r}}{\sum_{i=1}^n d_{ij}^{-r}}, \quad (2)$$

де x_j – точки, на які інтерполюють поверхню, x_i – дані в точках відбору. Оскільки $\phi(d) \rightarrow \infty$ як $d \rightarrow 0$, значення для точки інтерполяції, яке співпадає з величиною в точці може бути скопійованим. Це найпростіше лінійне інтерполювання, при якому зважені відстані розраховуються з лінійних функцій відстані між множиною точок і точкою, значення якої необхідно передбачити.

Інтерполяція на основі зворотніх відстаней звичайно використовується в ГІС для створення растрових шарів з точкових даних. Даний метод є одним з найбільш поширених за використання у сільськогосподарській практиці та при створенні карт властивостей ґрунтів зокрема [3, 4].

ТЕОРІЯ РЕГІОНАЛІЗОВАНОГО ВАРІЮВАННЯ І КРІГІНГ

За умов достатньої кількості зразків, більшість методів інтерполяції дають аналогічні результати. Коли дані розсіяні, вибір відповідного методу інтерполяції є надзвичайно важливим. Геостатистичні методи (*крігінг*), забезпечують оптимізацію інтерполяції на основі розподілу просторового варіювання на три складових:

- (1) *детерміністичне варіювання* (рівні або тренди), які можна використовувати в якості корисної інформації;
- (2) варіювання, що просторово автокорелюють і які характеризуються складністю інтерпретації;
- (3) шум, який не корелює.

Характер просторово корелюючого варіювання забезпечується функціями -- як автоковаріограмою та напівваріограмою. Експериментальні варіограми розраховуються на основі даних відбору зразків в одно-, двох-, трьохвимірному просторі. Такі експериментальні дані пристосовують до одного з видів варіограм, які використовують, щоб одержати величини для розрахунку зважених відстаней.

Методи геостатистики забезпечують значну гнучкість інтерполяції, надаючи можливість проведення інтерполяції на площі або об'єми, більші ніж підтримка (блочний крігінг), методи інтерполяції бінарних даних (індикаторний крігінг), методи вводу інформації про тренди (універсальний крігінг) або щодо стратифікації (стратифікований крігінг). Такі методи інтерполяції згладжують варіюючі поверхні і дають оцінку варіювання поверхні. Варіограми також можна використовувати для оптимізації схем відбору при картографуванні з точкових даних.

Геостатистичні методи інтерполяції передбачають, що просторове варіювання будь-якої послідовної характеристики надто нерегулярне, щоб здійснити моделювання за допомогою простої згладжуючої математичної функції. Варіювання можна описати за допомогою випадкових поверхонь. Атрибут характеризується як *регіоналізоване варіювання*. Інтерполяцію з використанням геостатистики називають *крігінгом*.

Методи геостатистики дають можливість вважати, що передбачення значень атрибутів у точках, в яких не проводився відбір зразків, є оптимальним з точки зору зробленого припущення. Оптимізація виступає правилом для динамічного

програмування з метою вибору значень варіювань таким чином, щоб оптимізувати критерії функції.

Згідно теорії регіоналізованої варіюючої, просторове варіювання будь-якої варіюючої величини можна відобразити як суму трьох головних компонентів. Нехай x -- положення точки в 1, 2 або 3-х вимірному просторі. Тоді величина рендомізованої варіюючої Z в точці x задається як:

$$Z(x) = m(x) + \varepsilon'(x) + \varepsilon'' \quad (3)$$

де $m(x)$ – детерміністична функція, яка описує “структурний” компонент Z в точці x ; $\varepsilon'(x)$ - величина, яка показує випадкові локально варіюючі, але просторово залежні залишкові від $m(x)$ -- регіоналізованої варіюючої, ε'' -- залишок, просторово незалежний шум Гаусса, який має нульове середнє значення і дисперсію σ^2 . При цьому Z – рендомізована функція, а не вимірювана величина атрибуту z .

На першому етапі необхідно зробити вибір функції для $m(x)$. В найпростішому випадку, коли відсутня тенденція та існує дрейф, $m(x)$ дорівнює середній величині і середня або очікувана різниця між будь-якими двома місцеположеннями x і $x + h$ розділена вектором відстані h , буде дорівнювати нулю:

$$E[Z(x) - Z(x+h)] = 0 \quad (4)$$

де $Z(x)$, $Z(x + h)$ – величини рендомізованої варіюючої Z в точках x , $x + h$. Також передбачається, що варіювання різниць залежить лише від відстані між ділянками, h , таким чином

$$E\{[Z(x) - Z(x + h)]^2\} = E\{\{\varepsilon'(x) - \varepsilon'(x + h)\}^2\} = 2\gamma(h), \quad (5)$$

де $\gamma(h)$ – напівваріювання. Дві умови, постійність різниці і варіювання різниць, визначають вимоги для внутрішньої гіпотези теорії регіоналізованої змінної. Коли обгрунтовано структурні складові, залишкове варіювання є однорідним, так що різниці між ділянками є просто функцією відстані між ними. Тому рівняння набуває вигляду:

$$m(x) = m(x) + \gamma(h) + \varepsilon'' \quad \text{для того, щоб відобразити рівноцінність між } \varepsilon'(x) \text{ і } \gamma(h).$$

Якщо задані внутрішньою гіпотезою умови виконані, напівваріювання можна оцінити з даних:

$$\hat{\gamma}(h) = 1/2n \sum_{i=1}^n \{z(x_i) - z(x_i + h)\}^2, \quad (6)$$

де n -- кількість пар точок спостережень величин атрибуту z , розділених відстанню h . Експериментальна варіограма є першим кроком у кількісній характеристиці регіоналізованого варіювання. Варіограма надає корисну інформацію для інтерполяції, оптимізуючи схему відбору зразків і визначаючи просторові зображення. Але перш ніж зробити це, спочатку необхідно підібрати теоретичну модель до експериментальної варіограми.

Крива, підібрана для експериментальних даних, відображає декілька важливих характеристик. По-перше, при високих значеннях h (відстані між точками відбору) вона вирівнюється. Горизонтальна частина варіограми називається сіл (sill). Передбачається, що при цих значеннях відстані між точками відбору, просторова залежність між величинами в точках відбору відсутня. По-друге, крива піднімається

від точки з низьким значенням $\gamma(h)$ до горизонтальної частини, досягаючи її в точці із значенням h , яку називають інтервал (граничний радіус кореляції). Це критично важлива частина варіограми, яка описує просторову залежність різниць між ділянками.

По-третє, підібрана модель не співпадає з первинною, але перетинає вісь u в точці з позитивним значенням $\gamma(h)$. Напівваріювання становитиме нуль, коли $h=0$. Позитивне значення $\gamma(h)$ $h \rightarrow 0$ є оцінкою залишку ε – шуму, який просторово не корелює. ε називають нагет (nugget, розсіювання помилок вимірювань).

Варіограма, яку можна подати у вигляді кривої Гаусса, свідчить про згладжене варіювання, наприклад для значень точок висот. Варіограма підібрана у вигляді сферичної моделі має чітко виражену перехідну точку, яка свідчить про домінування одного зразка. Вибір експоненціальної моделі варіограми передбачає, що варіювання має поступовий перехід в межах інтервалів або декілька зайвих зразків здійснюють свій вплив.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Дослідження проводились на базі модельного господарства “Біотех” Бориспільського району Київської області. Для одержання первинних даних вмісту рухомих форм елементів живлення та вивчення просторового варіювання їх у темно-сірому опідзоленому ґрунті при вирощуванні озимої пшениці, було створено регулярну сітку квадратів 20 x 20 м. Зразки ґрунту (20 проб) і рослин відбирались у фази початку виходу в трубку і повної стиглості зерна (сорт озимої пшениці Поліська 90). Підживлення пшениці азотом проведено в кінці III етапу органогенезу. Доза азоту – 30 кг/га. Під попередник озимої пшениці - картоплю внесено 6 ц добрива КЕМІРА. Під пшеницю основне добрива не вносили.

Зразок ґрунту складався з трьох бурових проб, відібраних в межах 1 м навколо точки з визначеними координатами. Відбір рослин в даних точках проводили для обліку та визначення варіювання урожайності і якості.

Ґрунт ділянки -- темно-сірий опідзолений крупнопилувато-легкосуглинковий, $pH_{КСГ}$ -6,1, гідролітична кислотність -- 2,3 мг-екв/100г, вміст гумусу -- 3,4 %, вміст азоту сполук, що легко гідролізують -- 44,5 мг/кг, рухомих фосфатів -- 215 мг/кг, обмінного калію -- 121 мг/кг (за методом Чирікова).

В досліді при визначенні просторового варіювання вмісту рухомих фосфатів використовували метод Мехлік 3 (0.2M CH_3COOH + 0.25 M NH_4NO_3 + 0,015M NH_4F + 0.013M HNO_3 + 0.001M EDTA) – pH 2.5. Це мультиелементний екстрагент, що може використовуватись для всіх типів ґрунтів. Для порівняння використовували стандартний метод визначення рухомих фосфатів за Чиріковим (оцтовокіслова витяжка).

Територія зони проведення досліджень знаходиться у другому агрокліматичному районі, який характеризується помірно-континентальним кліматом з достатнім зволоженням (гідротермальний коефіцієнт 1,2). Середні багаторічні дані Бориспільської метеорологічної станції свідчать про сприятливі умови для вирощування культур. Сума активних температур ($>10^0C$) становить 2650 0C . Тривалість вегетаційного періоду (з середньодобовою температурою понад

5°C) – 200 днів, періоду активної вегетації (середньодобова температура повітря понад 10°C) – 160 днів. Тривалість періоду з середньодобовою температурою повітря нижчою 10°C в середньому на рік 245 днів, безморозного періоду – 168 днів.

Для створення картографічного матеріалу та побудови варіограм використовувались програмні засоби ArcGIS 8.2, IDRISI 32 (версія 2), Gstat.

РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

Результати проведених досліджень свідчать про високу варіабельність вмісту рухомих фосфатів, сполук азоту, що легко гідролізують у темно-сірому опідзоленому ґрунті та показників якості зерна озимої пшениці. Величини вмісту рухомих фосфатів коливались в межах 50.8-113.3 за Чиріковим, 84.4-161.8 мг/кг за Мехлік 3. Підібрано експериментальні варіограми для передбачення вмісту рухомих фосфатів з використанням звичайного, простого, універсального і диз'юнктивного крігінга. Нами відмічено прогностні значення рухомих фосфатів за методом Мехлік 3, які вказують на наявність мікро- і мезоваріацій на дослідній ділянці.

Результати досліджень також свідчать про вплив якості внесення добрив, проведення агротехнологічних операцій, варіацій рельєфу, стану розвитку рослин на варіювання елементів живлення у ґрунті.

Аналіз просторової структури розміщення зразків вказує на недостатню кількість відібраних проб для розрахунку варіограми. Вибір регулярної сітки задовольняв вимоги створення послідовної поверхні для відображення варіювання елементів живлення у ґрунті та білковості зерна.

Визначення величини середньої квадратичної помилки проводили за формулою:

$$MSPE = 1/n \sum (z(x_i) - z_m(x_i))^2, \quad (7)$$

де n – кількість відібраних проб.

Дані таблиці 1 свідчать про можливість використання різних видів крігінга з метою створення поверхонь передбачень. Зокрема за умов відбору невеликої кількості зразків та використання регулярної сітки відбору менше значення MSPE виявив звичайний крігінг (для методу Мехлік 3). Простий і диз'юнктивний крігінг забезпечили меншу помилку передбачення для методу Чирікова при співвідношенні n/s (залишкова дисперсія/горизонтальна складова варіограми) = 0.3.

Аналіз створених неперервних поверхонь вмісту рухомих фосфатів у ґрунті показав, що вибір локального інтерполятора не є важливим при великій кількості точок відбору (кількість визначається сотнями). Крігінг може дати менш точні результати в порівнянні з методом зважених відстаней у випадку, коли неможливо ефективно підібрати варіограму за недостатньої кількості точок відбору або досить великої відстані між точками. Метод зважених відстаней доцільно використовувати за умов нечисленних множин точок, для яких параметри варіограми невідомі і для множин з великими відстанями між точками у сітці відбору зразків. Зокрема при визначенні фосфатів за методом Чирікова при невідомій просторовій структурі метод зважених відстаней характеризувався нижчим значенням помилки передбачення в порівнянні з універсальним і звичайним крігінгом.

Таблиця 1
Величина середньої квадратичної помилки за різних методів інтерполяції (відстань між точками відбору – 20 м)

Методи визначення рухомих фосфатів	Крігінг				Метод зважених відстаней
	звичайний	простий	універсальний	диз'юнктивний	
Метод Мехлік 3	18.43* 18.04**	18.73	19.8	18.9*	19.23
Метод Чирікова	14.90	14.16	19.6	14.12*	14.46

* n/s = 0.3 ** n/s = 0.1

Використання методів інтерполяції для створення неперервних поверхонь з точкових даних надає виняткову можливість зменшення кількості зразків при відборі, що знижує витрати на збір даних і проведення хімічних аналізів та забезпечує можливість розрахунку оптимальної кількості зразків для відбору з урахуванням точності визначення відповідного показника.

ВИСНОВКИ

Важливим елементом при розробці автоматизованих технологій точного землеробства виступає наявність достовірної і повної інформації про стан ґрунту. За допомогою створених картограм можна визначати диференційовані норми витрат технологічних матеріалів залежно від природно-меліоративних умов, агрофізичного, агрохімічного, екологічного стану та ряду інших факторів.

На основі одержаних експериментальних даних встановлено, що регулярний спосіб відбору зразків забезпечує можливість створення послідовної поверхні з використанням локального інтерполятора - методу найменших зважених відстаней і крігінга для побудови картограм вмісту рухомих форм елементів живлення та показників якості врожаю.

Список літератури

1. Географічні інформаційні системи/ За ред. Ван Мервіна М., Кохан С.С.-К.:НАУ.2003.-200 с.
2. Burgess T.M., Webster R. 1980. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. II. Block kriging. *J. Soil Sci.* 31: 333-341.
3. Kravchenko A.N. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1564-1571 (2003).
4. Van Meirvenne M., Maes K., Hofman G. 2003. Three-dimensional variability of soil nitrate-nitrogen in an agricultural field. *Biol. Fert. Soils.* 37: 147-158.

Стаття поступила в редакцію 20.05.05