



ГЕОСТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АГРОЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ҐРУНТІВ ЗАСОБАМИ ГІС

Описывается теория и практика применения геоинформационных и геостатистических методов для анализа данных об агроэкологическом мониторинге почв Киевской области.

The theory and practice of application of GIS and geostatistical methods for analysis of data on agroecological monitoring of soils of Kyiv Oblast are considered.

Постановка проблеми у загальному вигляді.

Необхідність покращення технік опрацювання екологічних даних для досягнення більшої ефективності процесу моніторингу природних комплексів зумовлена широким використанням нових методів аналізу. Застосування геостатистичних методів, які були розроблені спочатку як засіб оцінювання запасів руди, виявилось успішним і для аналізу даних моніторингу довкілля з різною метою. Інтерес до геостатистики як інструменту аналізу екологічних даних підтверджується зростанням кількості видань літератури відповідної тематики.

Геостатистика – це вид статистики, який використовується для аналізування та прогнозування просторових або просторово-часових явищ. Вона заснована на теорії районованих змінних [13], які поширені в просторі (тобто мають просторові координати), і показує просторову автокореляцію таким чином, що точки, які близькі одна до одної в просторі, більше схожі між собою, аніж ті, які віддалені одна від одної.

Геостатистичний підхід відрізняється від класичного статистичного тим, що він використовує концепцію районованих змінних. Якщо класична статистика оперує незалежними випадковими величинами, то геостатистика аналізує залежні змінні, які є районованими і корелюються у просторі або часі. Ступінь кореляції визначається за допомогою одного з основних інструментів геостатистики – напівваріограми, що оцінює ступінь кореляції між точками в залежності од відстані між ними (в просторі або часі). Ця інформація потім використовується у другому основному інструменті геостатистики: техніці оцінювання, відомій як кригінг.

На жаль, інтенсивне господарювання (зростання темпів промислового і сільськогосподарського навантаження на природні комплекси, неправильна утилізація відходів) спричинює значне техногенне трансформування ґрунтового покриву, яке часом перевищує темпи ґрунтоутворювального процесу.

Моніторинг, здійснюваний для виявлення змін у ґрунтовому покриві та з'ясування небезпеки надмірного забруднення, – дорогий процес. Оцінювання ризику забруднення в місцях, де не проводилося відбору проб ґрунту, має важливе значення для розмежування екологічно чистих і забруднених територій. Однак точність оцінювання ризику залежить від багатьох факторів, у т. ч. й від використо-

вуваної для цього методики.

Геостатистика має в своєму розпорядженні сучасні методи, які полегшують кількісне оцінювання просторових параметрів ґрунту і дозволяють їх просторово інтерполювати.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і які використала автор цього дослідження. Вивченням і застосуванням геостатистичних методів для моніторингу ґрунтів займалися багато зарубіжних вчених, зокрема Т. М. Бюррес, Р. Вебстер, А. Доберман, К. Карлон, Д. МакҐрас, А. Стейн, К. С. Чан та ін.

Дж. Маркус, А. Б. МакБратні [11], П. Говартс [7] зазначають, що геостатистика та ГІС стали важливими інструментами дослідження просторової невизначеності й оцінювання ризиків у процесі вирішення завдань екологічного моніторингу. Перші двоє наголошують, що постраждали від забруднення повинні мати уявлення про масштаби цього явища, рівень концентрації забруднювальних речовин у ґрунті, тобто про просторовий розподіл цих речовин.

Питаннями визначення рівнів забруднення важкими металами ґрунтів у сільських, міських та промислових районах, а також виявлення джерел антропогенного впливу на них геоінформаційними і геостатистичними методами займалися К. С. Чан, П. Врек, С. Пірс та інші вчені Великої Британії.

В Україні проблеми моніторингу, оцінювання стану, раціонального використання, охорони та відтворення ґрунтів вивчали О. Ф. Балацький, Г. Д. Гуцуляк, А. С. Даниленко, Д. С. Добряк, С. М. Іляшенко, В. В. Медведєв, Л. Г. Мельник, Л. В. Мельник, В. Я. Месель-Веселяк, А. М. Третяк, М. М. Федоров, С. Д. Черьомушкін, А. В. Чупіс та ін.

Визначенням агрохімічних і фізико-хімічних параметрів, важких металів і мікроелементів у ґрунтах на моніторингових контрольних ділянках займаються фахівці Державного науково-технологічного центру охорони родючості ґрунтів (Центрдержродючість), який підпорядкований Міністерству аграрної політики і продовольства України. Вони визначають стан родючості ґрунтів та його зміни і розроблюють агрозаходи із захисту ґрунтів від деградації. В. В. Медведєв, Т. М. Лактіонова та В. О. Греков у своїх публікаціях наголошують на важливості застосування геоінформаційних і геостатистичних методів для організації моделювання агроекологічного моніторингу ґрунтів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Глибокі дослідження питання



застосування геоінформаційних та геостатистичних методів для моделювання моніторингу ґрунтового покриття на регіональному рівні в Україні не проводилися.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Мета даної статті – дослідження теоретичних основ і практичних методів застосування геостатистики й геоінформатики в аналізі даних агроекологічного моніторингу ґрунтів, а її змістом є побудова геостатистичних моделей для оцінювання параметрів стану ґрунтів Київської області та визначення з-поміж них кращої, яка точно відображає явище, що вивчається, методом їхнього порівняння і перевірки.

Виклад основного матеріалу дослідження. Геостатистичні методи ґрунтуються на статистичних моделях, які враховують автокореляцію (статистичні взаємозв'язки між опорними точками). За допомогою цих методів можна не тільки побудувати потрібну поверхню, а й отримати кількісну оцінку точності інтерполяції.

В екологічних науках, зокрема при розгляді питання моніторингу природних комплексів, методи геостатистики використовують для оцінювання екологічного стану об'єктів, умісту забруднювальних речовин у повітрі, в поверхневих водах і ґрунтах, а також для встановлення рівня загрози довкіллю і здоров'ю населення.

Для організації правильного і ефективного вивчення наявних моніторингових даних про об'єкти природних комплексів (у нашому випадку це контрольні ділянки ґрунтів) та їх подальшого використання в аналізі ризиків для прийняття відповідних управлінських рішень необхідно було побудувати геостатистичні моделі. Такі моделі широко застосовуються для вирішення різних екологічних завдань, зокрема і для прогнозування явищ або процесів у місцях, де не проводились спостереження, а також для оцінювання цього прогнозування.

Загальну схему геостатистичної моделі передає мал. 1 [5].

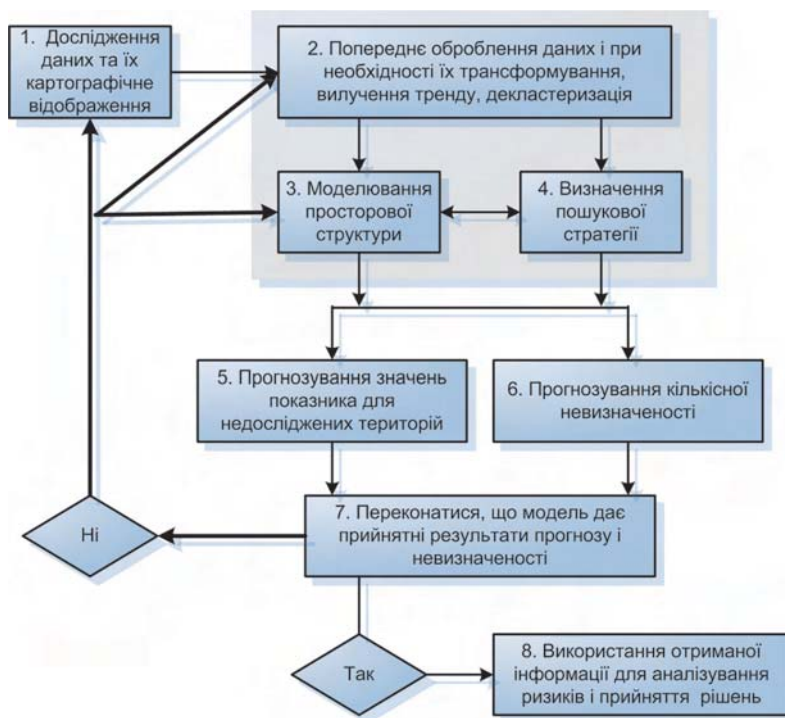
Геостатистика використовує техніку варіограми для вимірювання просторової мінливості районованої змінної і видає вхідні параметри для просторової інтерполяції кригінгу. Варіограма дорівнює добутку половини математичного очікування M_x на квадрат різниці між значеннями пар точок $Z(x)$ і $Z(x+h)$, де h – інтервал відстані між точками:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} M_x [Z(x) - Z(x+h)]^2. \quad (1)$$

Для дискретних ділянок відбору проб, таких як, наприклад, контрольні ділянки моніторингу ґрунту, функція оцінюється як

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2, \quad (2)$$

де $Z(x_i)$ – це значення змінної Z за місцеположенням



Мал. 1. Геостатистична модель

x_i ; $N(h)$ – число пар точок відбору проб ґрунту, які розділені інтервалом відстані h .

Для нерегулярного відбору проб це рідкісний випадок, коли відстань між вибраними парами точно дорівнює h . Частіше інтервал h подається як відстань групи точок. Варіограму всієї ділянки можна отримати обчисленням варіограм на різних інтервалах. Тоді її визначають з теоретичних моделей, таких як сферична чи експоненціальна, або гауссова. Одержана модель забезпечує інформацією про просторову структуру, а також вхідні параметри для інтерполяції методом кригінгу.

Метод кригінгу розглядається як найкращий метод оцінювання лінійної інтерполяції без зміщення і являє собою процес теоретичного зваженого ковзного середнього:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i), \quad (3)$$

де $Z(x_0)$ – це значення в місці, де не бралася проба ґрунту і яке буде приблизно оцінено в місці x_0 ; $Z(x_i)$ – відоме значення в місці відбору проб x_i . На відміну від інших методів (наприклад, зворотної зваженої відстані), вагова функція λ_i вже не є випадковою, а розраховується на основі параметрів варіограми моделі. Але при цьому, як і в інших методах, у кригінгу діє принцип, що точки, близькі одна до одної в просторі, більше схожі, ніж ті, які віддалені одна від одної. Оцінка є незміщеною, якщо сума ваг дорівнює одиниці. Тоді оцінка помилок (або кригінг відхилень) повинна бути зведена до мінімуму [6, 10, 11]:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1. \quad (4)$$



Нормальний розподіл для досліджуваних змінних є бажаним у лінійній геостатистиці [6]. Проте ця умова не завжди виконується. Нормальність не може бути строго обов'язковою, проте серйозні порушення нормальності, такі як занадто висока асиметрія і випадні значення, можуть погіршувати структуру варіограми і результати кригінгу. Як показує практика, часто спостерігаємо, що екологічні змінні не завжди підпорядковуються нормальному розподілу або мають позитивну асиметричність [14], тому трансформування є необхідним етапом для нормалізації таких наборів даних [12].

Дане дослідження виконане у відповідності до наведеної вище загальної схеми геостатистичної моделі.

Для проведення геостатистичного моделювання стану ґрунтового покриву використано вхідні дані про мережу з 12-ти контрольних ділянок, яка створена Центрдержродючістю спеціально для проведення постійного агроекологічного моніторингу. Мережа покриває територію Київської області нерівномірно: вона охоплює, на жаль, не всі природно-економічні зони, типи ґрунтів, не враховує всі ландшафтні особливості місцевості, рівень деградаційних процесів та ступінь забруднення земель [3]. Цей фактор негативно впливає на побудову геостатистичної моделі та на її репрезентативність. Але про це далі при описі вхідних даних та інших етапів побудови геостатистичної моделі.

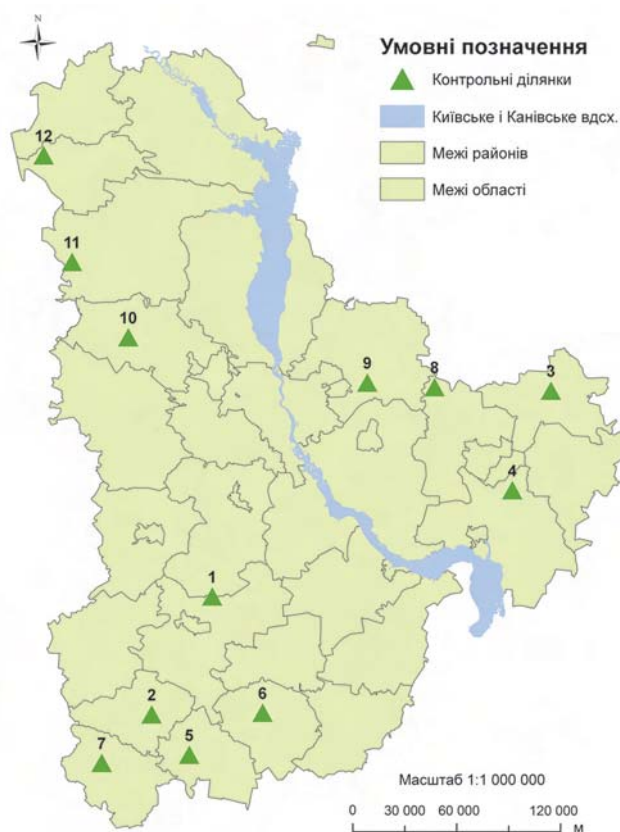
Контрольні ділянки мають форму квадрата розміром 100×100 м та прив'язку до місцевих ориєнтирів і системи координат.

У 2006-2010 рр. було проведено дослідження зразків ґрунту на 12-ти ділянках. Обстеження проводилося в один етап (тур) [2]. Визначалися такі показники якості ґрунтів: *фізико-хімічні*: рН сольової витяжки, обмінний кальцій, обмінний магній; *агрохімічні*: гумус, азот амонійний, рухомий фосфор, обмінний калій; *мікроелементи*: марганець, бор; *радіоактивні та важкі метали, пестициди*: цезій (Cs-137), стронцій (Sr-90), свинець (Pb), кадмій (Cd), мідь (Cu), цинк (Zn), ДДТ та ГХЦГ.

Дані про моніторинг ґрунтів та їх просторове розміщення надав Центрдержродючості у форматі табличного процесора Microsoft Excel, але в такому вигляді, що їх безпосередня інтеграція в середовище ArcGis 9.2 була неможливою. Тому на основі наданої інформації було побудовано нову реляційну базу даних статистики спостережень ґрунтів з ключовим атрибутом "Номер контрольної ділянки" для її підключення до бази геопросторових даних моніторингу природних комплексів.

Геокодування об'єктів мережі спостереження за ґрунтами здійснено за табличними наборами координат у текстовому вигляді – координати X та Y, за якими встановлювалося положення точкових об'єктів із заданими атрибутами. Результати процесу відображує мал. 2.

Далі було проаналізовано вхідні статистичні дані про моніторинг ґрунтів з використанням методів статистики й геостатистики та ГІС для виявлення просторових закономірностей їх розподілу і пошуку основи для оцінювання небезпеки забруднення.



Мал. 2. Розташування контрольних ділянок агроекологічного моніторингу ґрунтів на території Київської області

Оскільки проби ґрунту брали тільки на 12-ти ділянках, було складно оцінити тип розподілу статистичних даних. Тому було штучно об'єднано дані за різні роки по кожному показнику, збільшивши таким чином довжину ряду до 60-ти елементів.

Для перевірки нормального розподілу показників моніторингу ґрунтів, який є бажаним для кригінгу, було використано критерій асиметрії та ексцесу й критерій Пірсона, або критерій χ^2 [1].

У ході обчислень було виявлено, що лише результати спостереження за концентрацією амонійного азоту і свинцю розподілено за законом, який досить близький до нормального. Через те що 15 із 17-ти показників розподілено не за нормальним законом, це могло негативно вплинути на коректність побудови поверхні, що відображує концентрацію вимірюваного показника на території області. Тому вхідні дані було трансформовано за певним алгоритмом, щоб отримати розподіл, ближчий до нормального. При цьому було використано метод Бокса – Кокса і його окремий випадок – логарифмічне перетворення [4, 8-10].

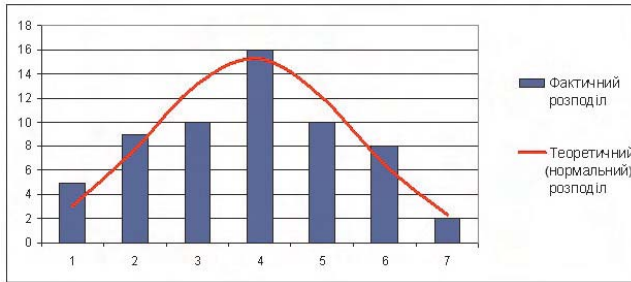
Перетворення Бокса – Кокса показало, що серед трансформованих даних аж 5 показників (до амонійного азоту і свинцю додалися марганець, мідь та цинк) мають значення критерію χ^2 більші за 0,75, а стронцій зі значенням $\chi^2=0,74$ дуже наблизився до них. Середнє значення критерію для нормального розподілу для даних, перетворених методом Бокса –



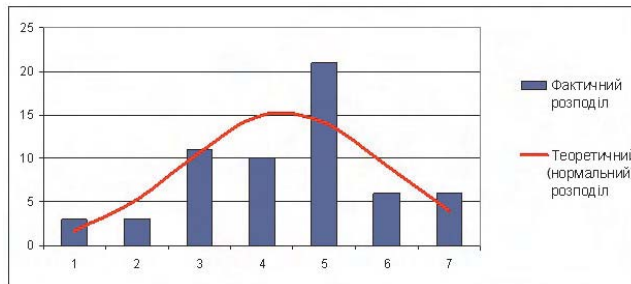
Кокса, становить 0,33986, тоді як для початкових даних зафіксовано 0,17255.

Для контролю було зроблено також перетворення даних логарифмічним методом. Виявилось, що не залишилося показників, для яких значення критерію χ^2 було б більше 0,75, а середнє його значення для всіх показників становило 0,17377.

Аналіз методів трансформування даних показав, що перетворення Бокса – Кокса найкраще трансформує дані: їх розподіл став ближчим до нормального (мал. 3).



а



б

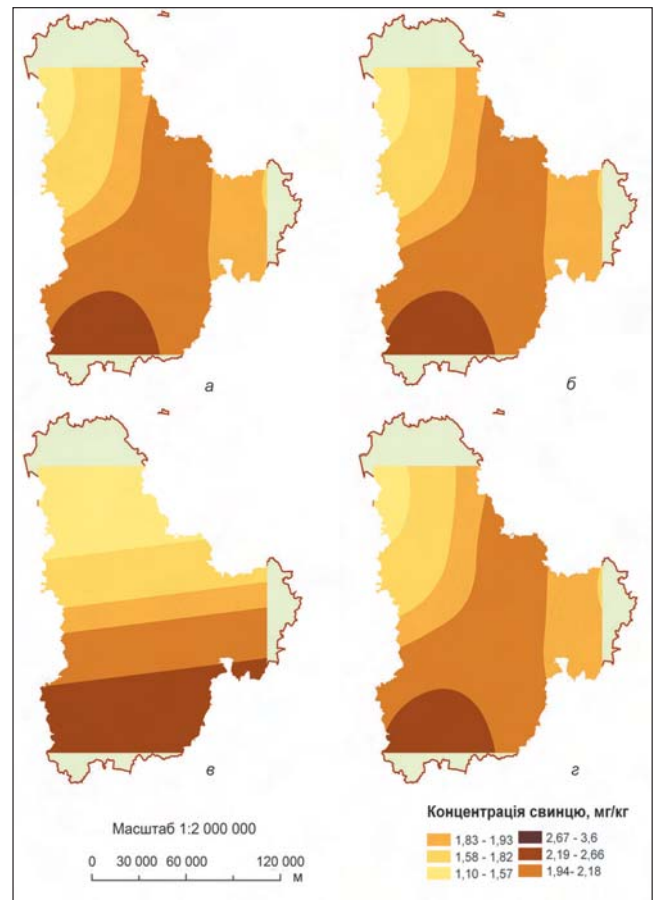
Мал. 3. Розподіл рівнів концентрації марганцю в місцях відбору проб ґрунту, отриманий методами:

а – Бокса – Кокса; б – логарифмічним.
По осі абсцис відкладено інтервали, на які було розділено дані; по осі ординат – кількість проб, що потрапили в інтервал

Далі наводиться приклад побудови геостатистичної моделі просторового розповсюдження свинцю в ґрунтах Київської області на основі трансформованих вхідних статистичних даних.

Просторова структура свинцю розкривається варіограмою поверхні, яка утворює форму зірки. Оскільки значення самородка досить велике (0,333), опорні точки розташовані на значних відстанях одна від одної (див. мал. 1), які більші, ніж радіус впливу. Це вказує на незначну кореляцію між ними. Через це побудовані моделі будуть неточними, бо для більшої точності необхідно більше опорних точок і менші відстані між ними.

Результати моніторингу рівня концентрації свинцю в ґрунтах Київської області було одержано з використанням чотирьох геостатистичних методів: ординарного, простого, універсального та диз'юнктивного кригінгу [5]. Інтерполяцію значень рівнів концентрації свинцю передає мал. 4.



Мал. 4. Результати інтерполяції значень свинцю з використанням різних методів кригінгу: а – ординарний; б – простий; в – універсальний; г – диз'юнктивний

Для виявлення кращого методу інтерполяції було виконано порівняння похибок інтерполяції за допомогою опції "Перехресна перевірка". Результати зібрано в таблиці.

За результатами аналізу метод універсального кригінгу було визнано оптимальним для інтерполяції значень просторового розподілу свинцю, бо його середня похибка найближча до нуля, середня квадратична похибка і середнє зі стандартних похибок інтерполяції мають найменші з обчислених значень, а середня квадратична нормована похибка найближча до одиниці. Проте цей вид кригінгу краще відображає лише даний випадок, побудова моделей для інших показників може потребувати інших видів кригінгу.

Порівняння похибок інтерполяції, виявлених у результаті перехресної перевірки в середовищі ArcGIS 9.2

Похибка	Види кригінгу			
	ординарний	диз'юнктивний	простий	універсальний
Середня	0,01160	0,03660	0,03660	0,00666
Середньоквадратична	0,54174	0,53708	0,53708	0,52882
Середня нормована	0,00933	0,05817	0,05817	0,00674
Середньоквадратична нормована	0,90043	0,99431	0,99431	1,08830
Середня стандартна	0,61151	0,55588	0,55588	0,49725



Висновки. Геостатистичні та геоінформаційні методи аналізу значно полегшують процес оцінювання показників ґрунтів, отриманих у ході агроекологічного моніторингу. Геостатистичні методи оперують залежними змінними, які корелюються в просторі або часі, причому ступінь кореляції між точками (в нашому випадку – між контрольними ділянками агроекологічного моніторингу ґрунтів) обернено пропорційно відстані між ними. Ці методи дозволяють не тільки інтерполювати значення в місцях, де не брали проби ґрунту, будувати поверхні просторового розподілу показників ґрунтового покриву, а й оцінювати похибку побудови геостатистичних моделей.

Практика показує, що досить часто екологічні змінні не підпорядковуються нормальному закону розподілу, який є бажаним для лінійної геостатистики. Так трапилося і в нашому дослідженні при перевірці статистичних даних показників стану ґрунтів контрольних ділянок. Виявилось, що дані не підпорядковуються нормальному закону розподілу, тому трансформування було визнано необхідним етапом їх нормалізації. Для перетворення даних про моніторинг ґрунтів було використано методи трансформування: Бокса – Кокса та його частковий випадок – логарифмічне перетворення. Результат трансформування показав, що перетворення методом Бокса – Кокса краще перетворює дані, наближуючи їх розподіл до нормального.

Побудована варіограма поверхні одного з показників стану ґрунту показала незначну кореляцію між контрольними ділянками, оскільки вони знаходяться далеко одна від одної. Адже 12-ти контрольних ділянок для агроекологічного моніторингу ґрунтів недостатньо для покриття спостереженнями території Київської області [3]. Це позначилося і на оцінці точності та репрезентативності побудованих геостатистичних моделей.

Отже, для підвищення точності геостатистичного моделювання агроекологічного моніторингу ґрунтів потрібно мати якомога більше контрольних ділянок.

Запропоновані в статті геостатистичні та геоінформаційні методи можна застосовувати для моделювання й оцінювання стану та змін інших компонентів природних комплексів при вирішенні завдань екологічного моніторингу, а отриману в результаті інформацію використовувати для аналізу ризиків та прийняття управлінських рішень.

Література

1. *Войтенко, С.П.* Математична обробка геодезичних вимірів. Теорія похибок вимірів: навчальний посібник / С.П. Войтенко. – К.: КНУБА, 2003. – 216 с.
2. *Звіт* Київського обласного державного проектно-технологічного центру охорони родючості ґрунтів і якості продукції про виконання проектно-технологічних та науково-дослідних робіт у 2010 році / Л.В. Бойко, В.Д. Зосімов, М.І. Майстренко [та ін.]. – К.: КОДПТЦОРГІЯП, 2011. – 245 с.
3. *Лазоренко-Гевель, Н.Ю.* Геоінформаційний аналіз структури мережі агроекологічного моніторингу ґрунтів / Н.Ю. Лазоренко-Гевель // Містобудування та територіальне планування. – 2012. – № 46. – С. 323-336 с.
4. *Перунов, А.Н.* Mathcad в руках економіста. Бокс-Кокс-преобразование и иллюзия "нормальности" макроэкономического ряда / А.Н. Перунов // Бизнес-информатика. – 2010. – № 2. – С. 3-10.
5. *ArcGIS 9. Geostatistical Analyst.* Руководство пользователя. – Russian Translation by DATA +, Ltd, 2001. – 285 с.
6. *Clark, I.* Practical Geostatistics / I. Clark, W.V. Harper. – Ecosse North America Llc, Columbus, Ohio, USA. – 2000. – 325 p.
7. *Goovaerts, P.* Geostatistical modeling of uncertainty in soil science / P. Goovaerts. – Geoderma 103. – 2001. – P. 3-26.
8. *Hossain, M.Z.* The Use of Box-Cox Transformation Technique in Economic and Statistical Analyses / M.Z. Hossain // Journal of Emerging Trends in Economics and Management Sciences (JETEMS) 2 (1): 32-39. – Scholarlink Research Institute Journals. – 2011. – P. 32-39.
9. *Krige, D.G.* A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand / D.G. Krige // J. Chem. Metall. Min. Soc. S. Africa. – 1951. – 52. – P. 119-139.
10. *Krige, D.G.* On the departure of ore value distributions from lognormal models in South African gold mines / D.G. Krige // J. S. Afr. Inst. Mining Metall. – 1960. – 61. – P. 231-244.
11. *Markus, J.* A review of the contamination of soil with lead II / J. Markus, A.B. McBratney // Spatial distribution and risk assessment of soil lead. Environment International. – 2001. – 27. – P. 399-411.
12. *McGratha, D.* Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silvermines area, Ireland / D. McGratha, C. Zhang, O.T. Carton // Environmental Pollution. – 2004. – 127. – P. 239-248.
13. *Matheron, G.* Principles of geostatistics. Econ. Geol / G. Matheron. – 1963. – 58. – P. 1246-1266.
14. *Zhang, C.S.* Background contents of heavy metals in sediments of the Changjiang River system and their calculation methods / C.S. Zhang, S. Zhang, L.C. Zhang, L.J. Wang // Journal of Environmental Sciences 7. – 1995. – P. 422-429.

Надійшла 21. 02. 13