

УДК 631.618:633.2.031
© 2011

Г.О. ЗАДОРЖНА,
кандидат біологічних наук

Т.Ю. БЕЦЬ,
здобувач

ПРОСТОРОВА МІНЛИВІСТЬ
ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ
ТЕХНОЗЕМІВ ТА ЗВ'ЯЗОК
З ЧИСЛЕННІСТЮ РОСЛИН

Установлено, що електрична провідність техноземів демонструє закономірну просторову мінливість, яка відповідає градієнтній просторовій структурі для дерново-літогенних ґрунтів на лесоподібних суглинках і для педоземів і просторовій структурі з декількома збурюваннями для дерново-літогенних ґрунтів на сіро-зелених глинах. Найбільш виражений просторовий зв'язок між електропровідністю ґрунтів і проективним покриттям рослинності, менш виражений – між електропровідністю та фітомасою.

Існує багато методів для потенційної характеристики ґрунтової просторової мінливості, включаючи георадар (ground penetrating radar – GPR), аерофотографії, мульти- і гіперспектральні космічні знімки, динамічний рефлектометр (time domain reflectometry – TDR) і спостережувану електричну провідність ґрунту (apparent soil electrical conductivity – EC_a). Проте жодний з них не був так інтенсивно вивчений, як застосування EC_a [3].

Оскільки електрична провідність ґрунтів може бути легко використана в сільському господарстві для вимірювання засоленості ґрунтів, то EC_a було застосовано для встановлення просторової варіабельності деяких фізико-хімічних властивостей, які впливають на цей показник [4]. Геопросторове вимірювання EC_a дуже добре характеризує просторову мінливість з низки причин. Ця ознака надійна, легко і швидко виконується. Обладнання для проведення вимірювань EC_a не громіздке і має доступну ціну. Нарешті, що дуже важливо, EC_a чутлива до впливу багатьох ґрунтових факторів, завдяки чому просторова мінливість цих властивостей може бути охарактеризована з використанням електричної провідності [3].

Традиційна система землеробства орієнтована на однорідне сприйняття поля, ігноруючи природним чином властиву мінливість ґрунтових умов між полями і в межах окремого поля. Без застосування системи глобального позиціонування (GPS) та обладнання для точного вимірювання врожайнос-

ті було важко встановити і задокументувати мінливість у просторі врожайності сільськогосподарських культур та ґрунтових властивостей. Останніми роками отримано переконливі результати того, що просторова мінливість у межах поля завелика, у 2–4 рази більша для врожайності і більш ніж на порядок величин для ґрунтових властивостей.

Просторова варіабельність врожайності є результатом комплексної взаємодії біологічних, едафічних, антропогенних, топографічних і кліматичних факторів [2].

Фундаментальним компонентом оцінки якості ґрунту на масштабному рівні поля є встановлення просторового розподілу ґрунтових властивостей, які впливають на важливі цілі управління і похідні функції. Недостатньо провести окремий вимір у межах поля для характеристики ґрунтових якостей. Навпаки, потрібну кількість вимірювань необхідно проводити в окремих точках для репрезентативної характеристики просторового розподілу існуючих ґрунтових кондицій, які впливають на сільськогосподарську діяльність, обумовлену ґрунтовими властивостями [3].

Таким чином, для оцінки якості ґрунту необхідні кількісні дані за кожною індикаторною властивістю, пов'язаною з ґрунтовою якістю, та інформація про просторову варіабельність цих індикаторних властивостей.

Геопросторове вимірювання EC_a успішно використовується з метою:

- ідентифікації ґрунтових фізико-хімічних властивостей, які впливають на врожайність і ґрунтові умови;

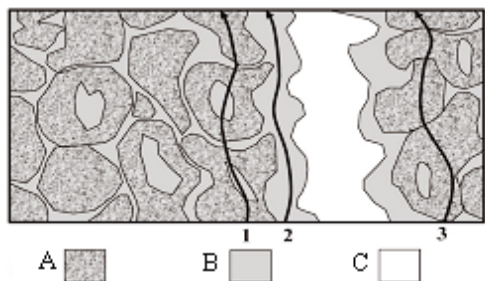


Рис. 1. Шляхи електричної провідності по фазах: А – тверда; В – рідка; С – повітря; 1 – твердо-рідкофазний струм; 2 – рідкофазний струм; 3 – твердофазний

- встановлення просторової варіації цих ґрунтових властивостей.

Перше використання геофізичних вимірювань EC_a в ґрунтознавстві було пов'язано з визначенням солоності в межах ґрунтового профілю в ґрунтах аридної зони [5]. Однак стало очевидним, що такі вимірювання EC_a в польових умовах є більш складними, ніж передбачалося спочатку у вигляді складності шляхів руху електричного струму, що є наслідком просторової гетерогенності властивостей, які впливають на струморух у ґрунті.

Існує три шляхи, за якими відбувається рух електричного струму в ґрунті (рис. 1):

- рідка фаза – через розчинені речовини, що містяться в ґрунтовій воді, яка займає великі пори;
- твердо-рідка фаза – електричний струм перебігає насамперед за допомогою обмінних катіонів, які пов'язані з глинистими мінералами;
- тверда фаза – струм перебігає через ґрунтові частинки, які знаходяться в безпосередньому контакті між собою [8].

З цих трьох шляхів твердофазний є мізерним, у результаті чого можна обговорювати подвійну паралельну систему, яка проводить електричний струм у ґрунті.

Метою нашої роботи було вивчення закономірностей просторової мінливості електричної провідності дерново-літогенних ґрунтів на лесоподібних суглинках і сіро-зелених глинах, а також у педоземах з насипним шаром чорнозему на науково-дослідному стаціонарі в м. Орджонікідзе. Потрібно встановити

зв'язок між електричною провідністю ґрунтів і фітомасою та проективним покриттям рослинності на зазначених типах техноземів.

Методи досліджень. Експериментальну ділянку з визначення оптимальних режимів рекультивативної закладено у 1968–1970 рр.

Для вимірювання електропровідності ґрунту *in situ* використовували сенсор HI 76305 (Hanna Instruments, Woodsocket, RI), який працює спільно з портативним приладом HI 993310. Тестер оцінює загальну електропровідність ґрунту, тобто об'єднану провідність ґрунтового повітря, води і часток. Однак підкреслимо відсутність однозначного зв'язку між насиченістю ґрунтового розчину солями і електропровідністю. Коефіцієнт переведення одиниць електропровідності (дС/м) в одиниці солоності (мг/л) варіює від 1 дС/м = 640 мг/л до 1 дС/м = 700 мг/л, що залежить від якісного складу розчинених солей. Порівняння результатів вимірювань приладом HI 76305 з даними лабораторних досліджень дозволили оцінити коефіцієнт переведення одиниць як 1 дС/м = 155 мг/л [7]. Неоднозначність переведення одиниць вимірювання приладу в одиниці електропровідності робить можливим використання тільки одиниць солоності – г/л.

Доведено, що результати вимірювань електропровідності приладом HI 76305 значно залежать від температури ґрунту. Так, зміна температури від 10 до 38 °С більш ніж удвічі змінює показання приладу [7]. Тому для отримання порівнянних результатів вимірювання приладом повинні проводитися за однакової температури.

Відбір проб проведено на варіанті техноземів сформованих та лесоподібних суглинках, на сіро-зелених глинах і на педоземах з насипним шаром чорнозему.

На ділянці з 1995 по 2003 рік зростав багаторічний бобово-злаковий агрофітоценоз [1], після чого почався процес натуралізації рослинного покриву.

Описання полігону досліджень наведено в статті О.В. Жукова та О.М. Кунах, опублікованій у цьому ж номері журналу.

Облік рослинності та вимірювання фітомаси проводили в межах квадратів з бовою стороною 0,5 м; збір матеріалу – у

**1. Статистичні та геостатистичні характеристики електропровідності
рекультивованих ґрунтів**

Показник	Лесоподібні суглинки	Сіро-зелені глини	Педозем
Середнє	1,48	1,95	1,73
Медіана	1,42	1,94	1,81
Ст. відхилення	0,25	0,29	0,54
Асиметрія	0,14	-0,02	-0,65
Екссес	-0,43	-0,22	0,46
Коефіцієнт варіації, %	17,01	14,83	31,40
<i>d</i>	0,09	0,06	0,09
C_0 (нагет)	0,04	0,05	0,07
C_1 (частковий поріг)	0,02	0,04	0,18
C_0+C_1 (поріг)	0,06	0,09	0,25
SDL, %	65,60	57,32	28,61
Радіус впливу, м	5,60	3,49	4,02
<i>I</i> -Морана	0,14	0,09	0,31
<i>p</i> -рівень	0,01	0,04	0,00

червні 2010 р. Рослини зрізали під корінь у середині дня, між сходом ранкової роси і початком утворення вечірньої, зв'язували у снопи і надсилали до лабораторії, де їх зважували. Було проведено таксономічне визначення виду рослин. Кількісно рослин оцінено за числом пагонів.

У кожній клітці полігону визначали загальне проективне покриття травостою за візуальною шкалою з градаціями 0, 10, ..., 90, 100 %.

Статистичні розрахунки проведені з використанням програми Statistica 7.0, двомірне картографування і оцінка геостатистичних показників – за допомогою програми Surfer 8.0, оцінка *I*-статистики Морана – GeoDa 0.9.5-і, обчислення SADIE-тесту – за допомогою програми QuickAssociation, обчислення корелограм Морана і тесту Мантеля – у програмі PASSaGE 2.

Результати досліджень та їх обговорення. Найбільше значення електропровідності характерно для дерново-літогенних ґрунтів на сіро-зелених глинах, а найменше – для дерново-літогенних ґрунтів на лесоподібних суглинках (табл. 1).

Найвищим ступенем варіювання характеризується електропровідність педоземів з насипним шаром чорнозему, а найнижчим –

техноземи на сіро-зелених глинах. Асиметрія і екссес розподілу електропровідності для всіх типів досліджених техноземів незначні, що характерно для нормального розподілу. Відповідність розподілів нормальному закону підтверджується статистикою Колмогорова-Смирнова (*d*), 5%-вий рівень вірогідності.

Спільний облік таких геостатистичних показників, як частковий поріг і нагет-ефект, дозволяє оцінити рівень просторової залежності (*spatial dependence level*) ($100-C_0/(C_0+C_1)$). Цей показник змінюється від 0 до 100 %. У разі сильної просторової залежності просторове відношення знаходиться в межах 0–25 %. Якщо просторове відношення знаходиться в межах 25–75 %, то залежність змінної є помірною; перевищує 75 % – змінна розглядається як слабо просторово залежна. Отже, просторова мінливість електропровідності в педоземах найближча до сильної просторової залежності, а в дерново-літогенних ґрунтах на лесоподібних суглинках і сіро-зелених глинах – до помірної.

Радіус впливу свідчить про масштаб просторового взаємозв'язку досліджуваної змінної. Ця геостатистика найбільша для дерново-літогенних ґрунтів на лесоподібних суглинках, найменша – для техноземів на сіро-зелених

БІОГЕОЦЕНОЛОГІЯ, ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ ТА ЗБАЛАНСОВАНЕ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Просторова мінливість електричної провідності
техноземів та зв'язок з численністю рослин

глинах. Педоземи займають проміжне положення. Незважаючи на відмінності ґрунтів за цим показником, порядок величин масштабу просторової взаємодії для вивчених ґрунтів близький і знаходиться в межах декількох метрів, що може свідчити про подібність причин, які визначають просторову мінливість електричної провідності техноземів.

Тотальна *I*-статистика Морана також підтверджує просторову обумовленість мінливості електропровідності техноземів. Корелограма за допомогою *I*-статистики Морана дозволяє виявити просторову структуру процесу (рис. 2).

Аналіз корелограм Морана зручно поєднувати з вивченням карт просторової мінливості ознаки (рис. 3).

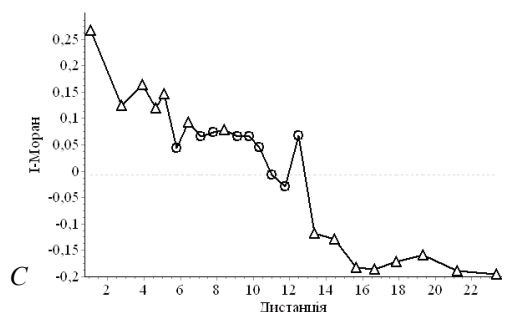
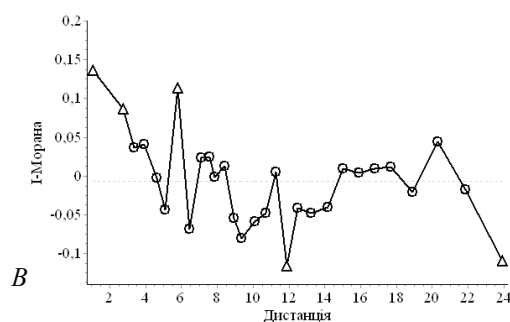
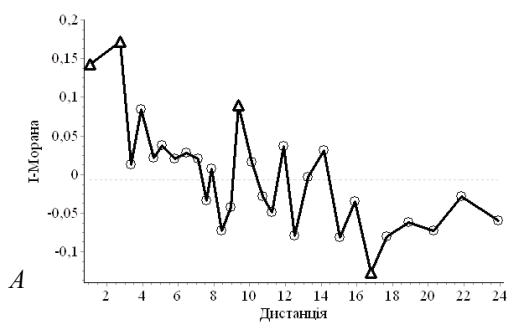
Структура корелограми Морана для дерново-літогенних ґрунтів на лесоподібних суглинках і педоземів відповідає градієнтній просторовій структурі [6]. На карті мінливості електропровідності в зазначених ґрунтах спостерігаються зони з підвищеним рівнем цієї ознаки з градієнтним переходом у зони низької електропровідності. Середні розміри ділянок з однорідною величиною ознаки відповідають 4–5 м для техноземів на лесо-

подібних суглинках (рис. 3,А) і 4–9 м для педоземів (рис. 3,С). Нижня границя наведеної оцінки близька до значення радіуса впливу для варіограми і значення максимальної дистанції корелограми, за якої спостерігається вірогідна автокореляція.

Структура корелограми Морана для дерново-літогенних ґрунтів на сіро-зелених глинах (рис. 3,В) відповідає просторовій структурі з деякими збуреннями [6], які являють собою мозаїчні поєднання ділянок з високою і низькою електропровідністю. Розмірні характеристики елементів мозаїки також можна встановити як за допомогою показника радіуса впливу варіограми, так і за корелограмою Морана. На карті електропровідності цієї ділянки видно, що мозаїчними плямами мають розмір 3,5–4 м.

Для оцінки зв'язку між електричною провідністю ґрунту і показниками кількості фітоценозу – фітомаси та проективним покриттям – були застосовані різні показники (табл. 2).

Коефіцієнт кореляції Пірсона вказує на вірогідний позитивний зв'язок між електричною провідністю і проективним покриттям рослинності на ділянках з дерново-літогенними



Δ – статистично вірогідні (з урахуванням корекції Бонферроні) індекси Морана;
○ – невірогідні індекси.

Рис. 2. Корелограма Морана електропровідності техноземів:
А – дерново-літогенні ґрунти на лесоподібних суглинках;
В – дерново-літогенні ґрунти на сіро-зелених глинах;
С – педозем з насипним шаром чорнозему

БІОГЕОЦЕНОЛОГІЯ, ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ ТА ЗБАЛАНСОВАНЕ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Просторова мінливість електричної провідності
техноземів та зв'язок з численністю рослин

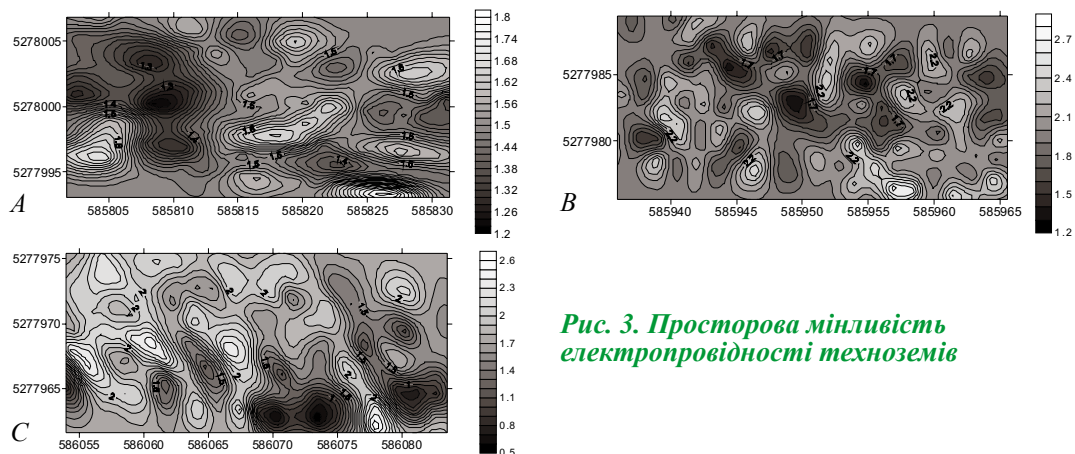


Рис. 3. Просторова мінливість
електропровідності техноземів

грунтами на лесоподібних суглинках і з педоземом та негативний зв'язок на ділянці з дерново-літогенними грунтами на сіроземях. Для техноземів на сіро-зелених глинах і з насипними шаром чорнозему коефіцієнт кореляції Пірсона свідчить про аналогічний зв'язок з фітомасою, як і у випадку з проективним покриттям, а для техноземів на лесоподібних суглинках цей зв'язок статистично невіргодний. Ще раз відзначимо, що коефіцієнт кореляції Пірсона не враховує просторового роз-

міщення порівнюваних показників.

Статистика *I*-Морана враховує особливості зміни досліджуваного явища в даній точці порівняно з її оточенням. В якісному аспекті результати оцінки зв'язку за допомогою статистики *I*-Морана відповідають результатам, які отримані з використанням коефіцієнта кореляції Пірсона. Відмінність полягає в тому, що для взаємозв'язку фітомаси та електричної провідності на дерново-літогенних грунтах і сіро-зелених глинах статистика

2. Міри зв'язку між електричною провідністю ґрунту і показниками кількості фітоценозу

Показник	Міра зв'язку	Лес		Сіро-зелені глини		Педозем з насипним шаром чорнозему	
		значення	<i>p</i> -рівень	значення	<i>p</i> -рівень	значення	<i>p</i> -рівень
Покриття, %	<i>r</i> -Пірсона	0,34	0,000	-0,21	0,01	0,22	0,005
Фітомаса, г/м ²	<i>r</i> -Пірсона	0,09	0,260	-0,06	0,469	0,24	0,002
Покриття, %	<i>I</i> -Морана	0,08	0,05	-0,08	0,03	0,14	0,001
Фітомаса, г/м ²	<i>I</i> -Морана	-0,01	0,77	-0,09	0,02	0,21	0,001
Покриття, %	SADIE-тест	0,12	0,083	-0,19	0,982	0,35	0,000
Фітомаса, г/м ²	SADIE-тест	-0,01	0,558	-0,13	0,954	0,42	0,000
Покриття, %	Тест Мантеля	0,12	0,000	0,07	0,018	0,07	0,041
Фітомаса, г/м ²	Тест Мантеля	-0,03	0,396	0,02	0,483	0,02	0,277
Покриття, %	Частковий тест Мантеля	0,12	0,002	0,07	0,013	0,04	0,110
Фітомаса, г/м ²	Частковий тест Мантеля	-	-	-	-	-	-

БІОГЕОЦЕНОЛОГІЯ, ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ ТА ЗБАЛАНСОВАНЕ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Просторова мінливість електричної провідності
техноземів та зв'язок з численністю рослин

I-Морана вказує на вірогідний зв'язок.

Міра зв'язку, яка встановлена за допомогою SADIE-тесту, враховує більш складні і нелінійні взаємодії між порівнюваними показниками. За результатами SADIE-тест не встановлено статистично вірогідного просторового зв'язку між проективним покриттям та фітомасою, з одного боку, та електричною провідністю техноземів на сіро-зелених глинах, з іншого. Решта показників SADIE-тесту відповідає результатам, отриманим з використанням коефіцієнтів Пірсона та *I*-Морана.

Тест Мантеля порівнює матриці мір відстаней між точками, що вивчаються, за досліджувальними ознаками. Найбільш очевидно є матриця мір географічних відстаней між точками. Відстань також може бути встановлена у просторі електричної провідності, проективного покриття або фітомаси. Матриця містить інформацію про всі попарні відстані між вивченими точками. Тест Мантеля вказує на кореляцію матриць мір відстаней між електричною провідністю і проективним покриттям для всіх вивчених типів

техноземів. Для взаємозв'язку електричної провідності та фітомаси тест Мантеля вірогідно не відрізняється від нуля.

Тест Мантеля може вказувати на безпосередній зв'язок між змінними; цей зв'язок може бути викликаний і впливом загальної для двох змінних причиною. Такою причиною може виступати просторовий тренд, загальний для двох змінних. Гіпотезу про дію загальної просторової причини можна перевірити за допомогою часткового тесту Мантеля при фіксованій матриці мір просторових відстаней [6]. Для взаємозв'язку проективного покриття і електропровідності дерново-літогенних ґрунтів на лесоподібних суглинках і на сіро-зелених глинах частковий тест Мантеля не відрізняється від тесту Мантеля. Це свідчить про те, що просторова компонента не позначається на взаємодії цих величин. Для педоземів врахування просторової матриці приводить до того, що частковий тест Мантеля стає невірогідним. Це свідчить про те, що зв'язок між електропровідністю і проективним покриттям опосередкований просторовим трендом.

Висновки

1. Електрична провідність ґрунтів у досліджених типах техноземів демонструє закономірну просторову мінливість, яка відповідає градієнтній просторовій структурі для дерново-літогенних ґрунтів на лесоподібних суглинках і для педоземів та просторової структури з деякими збуреннями для дерново-літогенних ґрунтів на сіро-зелених глинах.

2. Просторова мінливість електропровідності в педоземах найбільш близька до сильної просторової залежності, а в дерново-літогенних ґрунтах на лесоподібних суглинках і сіро-зелених глинах – до помірної.

3. Найбільш виражений просторовий зв'язок між електричною провідністю ґрунту і проективним покриттям рослинності. Зв'язок електропровідності з фітомасою менш виражений.

4. Зв'язок між електропровідністю і проективним покриттям рослинності на дерново-літогенних ґрунтах на лесоподібних суглинках і сіро-зелених глинах є безпосереднім, а у випадку педоземів цей зв'язок опосередкований загальним просторовим трендом.

Бібліографія

1. Устойчивое развитие сложных экотехносистем / [Шемавнев В.И., Гордиенко Н.А., Дырда В.И., Забалуев В.А.] – М.–Днепропетровск, 2005. – 355 с.

2. Bullock D.S. Economic optimality of input application rates in precision farming / D.S. Bullock, D.G. Bullock // Prec. Agric. – 2000. – Vol. 2. – P. 71–101.

3. Corwin D.L. Geospatial Measurements of Apparent Soil Electrical Conductivity for Characterizing Soil Spatial Variability / D.L. Corwin // J. Alvarez-Benedi (edit.) Soil-Water-Solute Process Characterization. An Integrated Approach. – 2005. – P. 639–672.

4. Corwin D.L. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture – theory, principles, and guidelines / D.L. Corwin, S.M. Lesch // Agron. J. – 2003. – Vol. 95(3). – P. 455–471.

5. Halvorson A.D. Field mapping soil conductivity to delineate dryland seeps with four-electrode techniques / A.D. Halvorson, J.D. Rhoades // Soil Sci. Soc. Am. J. – 1976. – Vol. 44. – P. 571–575.

6. Legendre P. Spatial pattern and ecological analysis / P. Legendre, M.J. Fortin // Vegetatio. – 1989. – Vol. 80. – P. 107–138.

7. Pennisi B.V. 3 ways to measure medium EC / B.V. Pennisi, M. van Iersel // GMPro. – 2002. – Vol. 22(1). – P. 46–48.

8. Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations / [J.D. Rhoades, N.A. Manteghi, P.J. Shouse, W.J. Alves] // Soil Sci. Soc. Am. J. – 1989. – Vol. 53. – P. 433–439.