

ПРОСТОРОВА ВАРІАБЕЛЬНІСТЬ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ҐРУНТІВ АРЕНИ ДОЛИНИ Р. ДНІПРО (У МЕЖАХ ПРИРОДНОГО ЗАПОВІДНИКУ «ДНІПРОВСЬКО-ОРІЛЬСЬКИЙ»)

О.В. Жуков^{1,2}, О.М. Кунах^{1,3}, В.О. Таран¹, М.М. Лебединська²

¹ Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара. Email: Zhukov_dnepr@rambler.ru

² Дніпропетровський державний аграрно-економічний університет

³ Природний заповідник «Дніпровсько-Орільський». Email: olga-kunakh@rambler.ru

У межах експериментального полігону на арені р. Дніпро в природному заповіднику «Дніпровсько-Орільський» в 241 точці була виміряна електрична провідність ґрунту двома способами: у стані природної вологості та у стані повної вологоємності. Встановлено, що в середньому електропровідність становить 0.068 ± 0.002 та 0.267 ± 0.014 дСм/м відповідно. У результаті проведеного дослідження нами встановлена процедура, яка дозволяє трансформувати точкові об'єкти, які містять інформацію про електричну провідність ґрунту в континуальний (растровий) шар на основі визначеної регресійної залежності досліджуваного показника від предикторів, які встановлені на основі даних дистанційного зондування поверхні Землі. Предикторами виступають канонічні осі, які одержані внаслідок змішаного аналізу відповідностей, якому піддали континуальні дані (цифрова модель рельєфу та її похідні, вегетаційні та інші індекси Landsat, значення рельєфного різноманіття та різноманіття рослинного покриву) та дискретні дані (результати класифікації поверхні Землі на елементарні рельєфні одиниці та типи рослинного покриву). Важливим результатом є залежність електричної провідності ґрунту від показників рельєфного різноманіття та різноманіття рослинного покриву.

Ключові слова: електрична провідність ґрунту, цифрова модель рельєфу, NDVI, регресійний аналіз, змішаний аналіз відповідностей, просторова модель.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОПРОВодНОСТИ ПОЧВ АРЕНА ДОЛИНЫ Р. ДНЕПР (В ПРЕДЕЛАХ ПРИРОДНОГО ЗАПОВЕДНИКА «ДНЕПРОВСКО-ОРЕЛЬСКИЙ»)

А.В. Жуков^{1,2}, О.Н. Кунах^{1,3}, В.А. Таран¹, М.М. Лебединская²

¹ Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара. Email: Zhukov_dnepr@rambler.ru

² Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет

³ Природный заповедник «Днепровско-Орельский». Email: olga-kunakh@rambler.ru

В пределах экспериментального полигона на арене р. Днепр в природном заповеднике «Днепровско-Орельский» в 241 точке была измерена электрическая проводимость почвы двумя способами: в состоянии естественной влажности и в состоянии полной влагоёмкости. Установлено, что в среднем электропроводность составляет 0.068 ± 0.002 и 0.267 ± 0.014 дСм/м соответственно. В результате проведенного исследования нами установленная процедура, которая позволяет трансформировать точечные объекты, которые содержат информацию об электрической проводимости почвы в континуальный (растровый) слой на основе

Citation:

Zhukov, O.V., Kunah, O.M., Taran, V.O., Lebedinska, M.M. (2016). Spatial variability of soils electrical conductivity within arena of the river Dnepr valley (territory of the natural reserve «Dniprovsko-orilsky»). *Biological Bulletin of Bogdan Chmelnytsky Melitopol State Pedagogical University*, 6 (2), 129–157.

Поступило в редакцию / Submitted: 13.04.2016

Принято к публикации / Accepted: 28.05.2016

crossref <http://dx.doi.org/10.15421/201646>

© Zhukov & al., 2016

Users are permitted to copy, use, distribute, transmit, and display the work publicly and to make and distribute derivative works, in any digital medium for any responsible purpose, subject to proper attribution of authorship.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 3.0 License

установленої регресійної залежності досліджуваного показателя від предикторів, які отримані на основі даних дистанційного зондування поверхні Землі. Предикторами виступають канонічні осі, які отримані в результаті смешанного аналізу відповідностей, якому піддали континуальні дані (цифрова модель рельєфу та її похідні, вегетаційні та інші індекси Landsat, значення рельєфного різноманітності та різноманітності рослинного покриву) та дискретні дані (результати класифікації поверхні Землі на елементарні рельєфні одиниці та типи рослинного покриву). Важливим результатом є залежність електричної провідності ґрунту від показників рельєфного різноманітності та різноманітності рослинного покриву.

Ключові слова: електрична провідність ґрунту, цифрова модель рельєфу, NDVI, регресійний аналіз, смешаний аналіз відповідностей, просторова модель.

SPATIAL VARIABILITY OF SOILS ELECTRICAL CONDUCTIVITY WITHIN ARENA OF THE RIVER DNEPR VALLEY (TERRITORY OF THE NATURAL RESERVE “DNIPROVSKO-ORILSKY”)

O.V. Zhukov^{1,2}, O.M. Kunah^{1,3}, V.O. Taran¹, M.M. Lebedinska²

¹ Oles Gonchar Dnipropetrovsk national university. Email: Zhukov_dnepr@rambler.ru

² Dnipropetrovsk state agrarian-economic university

³ Natural reserve «Dniprovsko-Orilsky». Email: olga-kunakh@rambler.ru

Within experimental range on arena of the river Dnepr in natural reserve “Dneprovsko-Orelsky” in 241 points electric conductivity of soil has been measured by two ways: in a condition of natural humidity and in a condition of a full moisture capacity. It is established that on the average electrical conductivity makes 0.068 ± 0.002 and 0.267 ± 0.014 dSm/m accordingly. As a result of the carried out research by us the established procedure which allows to transform point objects which contain the information on electric conductivity of soil in continual (raster) layer on the basis of established regression dependences of an investigated indicator from predictors which are received on the basis of data of remote sensing of a surface of the Earth. Canonical axes received as a result of the mixed correspondence analysis have been used as regression predictors. Continual data (digital elevation model and its derivative, vegetative and other Landsat indexes, relief and vegetative cover diversity indexes) and discrete data (results of Earth surface classification on elementary relief units and types of a vegetative cover) have been calculated by mixed correspondence analysis. The important result is dependence of electric conductivity of soil on indicators of a relief and a vegetative cover diversity.

Key words: electric conductivity of soil, digital elevation model, NDVI, regression analysis, mixed correspondence analysis, spatial model.

ВСТУП

Існують різні підходи для виявлення та картування ґрунтових умов, які впливають на ієрархічну організацію екосистем (Шейн, Милановський, 2001; Жуков, 2006; Жуков і др., 2013). Для виконання цього завдання може бути використана інтенсивна стратегія відбору ґрунтових зразків у комірках регулярної сітки. Однак, такий тип інтенсивного збору даних по комірках регулярної сітки є трудомістким і витратним, що робить такий підхід непрактичним для застосування за умов значної довжини досліджуваної території (Балюк і др., 2014). У роботі Francis, Schepers (1997) був застосований метод вибіркового збору ґрунтових зразків для визначення границь зон застосування добрив. Визначення місць відбору проб проведено на основі відомостей про колір ґрунту, текстури, куту нахилу поверхні, ерозійних характеристик. Едафічні властивості впливають на спостережувану електропровідність ґрунту (EC_a). Просторовий розподіл цього показника в межах поля забезпечує потенційну можливість картування просторової мінливості едафічних властивостей, ґрунтуючись на відборі ґрунтових проб, місце обліку яких визначається за EC_a . У випадку, коли EC_a корелює з певною ґрунтовою властивістю, то EC_a -спрямована система збору зразків дозволить установити просторовий розподіл цієї властивості, а також оптимальну кількість і місця розташування відбору проб для характеристики мінливості при мінімізації трудовитрат (Corwin et al., 2003). Також, якщо EC_a корелює із урожайністю, то EC_a -спрямована система відбору зразків може бути використана для ідентифікації ґрунтових властивостей, які впливають на мінливість урожайності (Corwin et al., 2003).

Важливо відзначити, що геопросторові виміри ES_a самі по собі не можуть прямо характеризувати просторову мінливість ґрунтових властивостей. У реальності, вимірювання ES_a надають обмежену пряму інформацію про фізико-хімічні властивості ґрунту, які впливають на врожай та на транспорт розчинених речовин або визначають якість ґрунту. Однак спостереження за зміною в просторі ES_a забезпечують інформацією, необхідною для організації збору агрохімічних зразків. Такий підхід є економічним засобом для оптимізації збору даних про ґрунт (Жуков и др., 2012; Демидов и др., 2013). Місця розташування точок відбору проб і їх кількість можуть бути визначені на підставі таких програмних продуктів, як ESAP (Corwin, Lesch, 2005; Балюк и др., 2014).

В алгоритмі адаптивної стратегії оптимального розміщення відбору проб для вивчення просторової організації угруповань ґрунтових тварин в умовах урбанізації у якості керуючих змінних використані головні компоненти, отримані в результаті аналізу польових даних по твердості та електропровідності ґрунтів і щільності деревостану, зібраних за квазірегулярною сіткою. Для встановлення просторової конфігурації типів біогеоценозів застосовані дані дистанційного зондування землі та проведений аналіз цифрової моделі рельєфу (Балюк и др., 2014). В умовах сільськогосподарського виробництва встановлений та доведений зв'язок між формуванням профілю чорнозему за твердістю та біологічною продуктивністю агроценозів за показниками нормалізованого різницевого вегетаційного індексу (Жуков и др., 2013; Жуков и др., 2014).

Електропровідність ґрунту найбільшою мірою відбиває дві його особливості – вологість та мінералізацію ґрунтового розчину (Демидов и др., 2013). Слід відзначити, що режим вологості едафотопу (гігротоп) та режим мінерального живлення (трофотоп) визначають лісорослинні умови, які формують специфічні обставини для відповідного типу біогеоценозу (Бельгард, 1950). Тому електропровідність ґрунту можна розглядати як інформаційно цінний маркер екологічних умов.

Мета нашого дослідження полягає у розробці процедури прогнозування просторової мінливості електричної провідності ґрунту в межах ландшафту на основі встановлення зв'язку спостережуваного показника з даними, встановленими на основі дистанційного зондування поверхні Землі.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

1. Дослідний полігон та вимірювання електричної провідності ґрунту

Дослідний полігон займає північно-східну частину природного заповідника «Дніпровсько-Орільський» (рис. 1). Лівий нижній кут полігону має координати $48^{\circ}30'34''$ п.ш. та $34^{\circ}48'7''$ сх.д. Ширина полігону складає 3260 м, висота – 2850 м, таким чином загальна площа складає 930 га.

Вимірювання електричної провідності ґрунту (*apparent soil electrical conductivity* – ES_a) за допомогою сенсора HI 76305 (Hanna Instruments, Woodsocket, RI) показали свою значну результативність у проведенні ґрунтового-екологічних досліджень (Жуков и др., 2010; Пахомов и др., 2010; Коломбар та ін., 2014). Цей сенсор представляє собою сталений амперметричний зонд, який може бути уведений безпосередньо у ґрунт. Він працює разом із портативним приладом HI 993310. Тестер швидко і точно оцінює загальну електропровідність ґрунту, тобто об'єднану провідність ґрунтового повітря, ґрунтової вологи та часток твердої фази ґрунту. Результати вимірювань приладу представлені в одиницях насиченості ґрунтового розчину солями – г/л. Однак слід відзначити, що немає однозначного зв'язку між насиченістю ґрунтового розчину солями й електропровідністю. Коефіцієнт переведення одиниць електропровідності (дСм/м – дециСіменс на метр) у одиниці солоності (мг/л) варіює від 1 дСм/м=640 мг/л до 1 дСм/м=700 мг/л, що залежить від якісного складу розчинних солей. Порівняння результатів вимірювань приладом HI 76305 із даними лабораторних досліджень дали змогу оцінити коефіцієнт переведення одиниць: 1 дСм/м=155 мг/л (Pennisi, van Iersel, 2002; Scoggins, van Iersel, 2006).

Вимірювання електричної провідності ґрунту проведено в 241 точці (рис. 2). Відстань між найближчими точками становить у середньому $30,9 \pm 1,5$ м (мінімум – 6,3, максимум – 136,5 м, у 95 % випадках цей показник знаходиться в діапазоні 8,0–101,7 м). За допомогою інструменту «Щільність ядер» (ArcGis 10.0) встановлено, що середня щільність точок вимірювань становить 0,58 точок/га (мінімум – 0, максимум – 7,8 точок/га).

У кожній точці вимірювання проводили у триразовій повторності у двох варіантах. Перший варіант – вимірювання у ґрунті у стані природної (польової) вологості. Другий варіант – перед ви-

мірюванням ґрунт попередньо зволожувався дистильованою водою до стану повної вологоємності (Смагин, 2012).

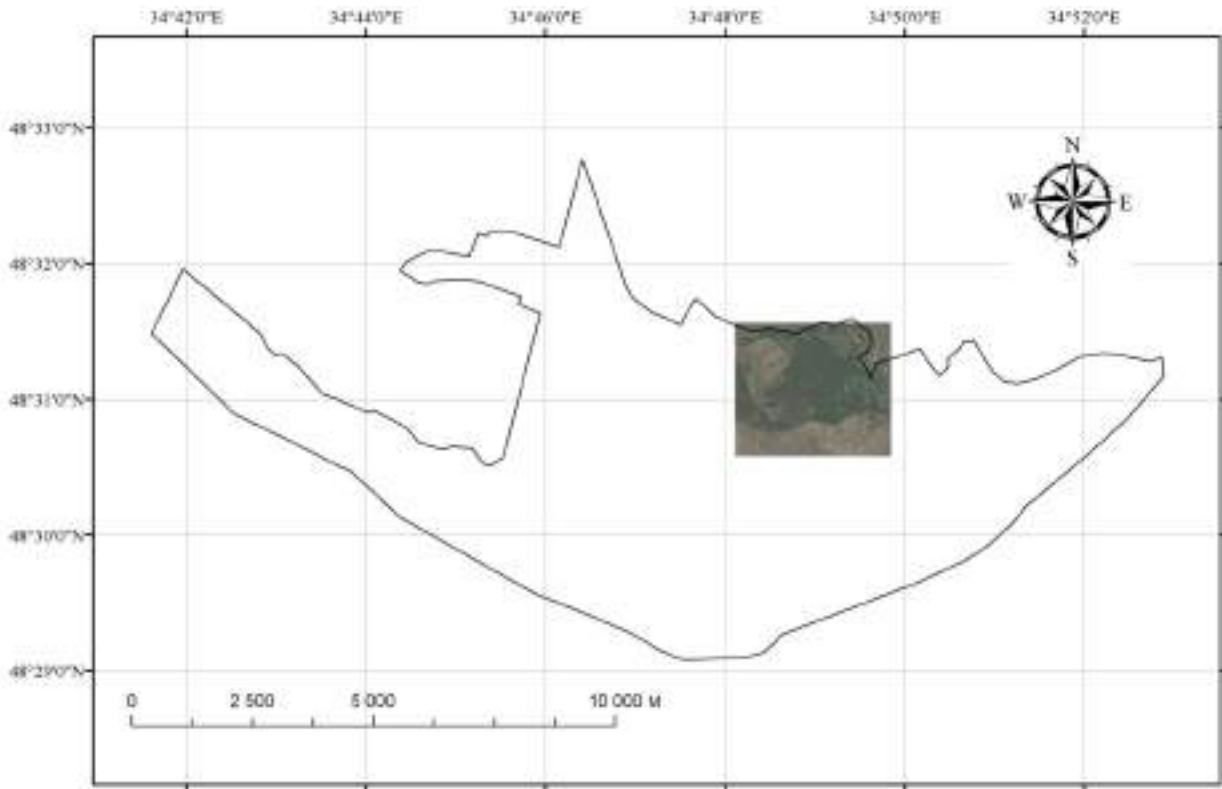


Рис. 1. Розміщення полігону в межах природного заповіднику «Дніпровсько-Орільський».

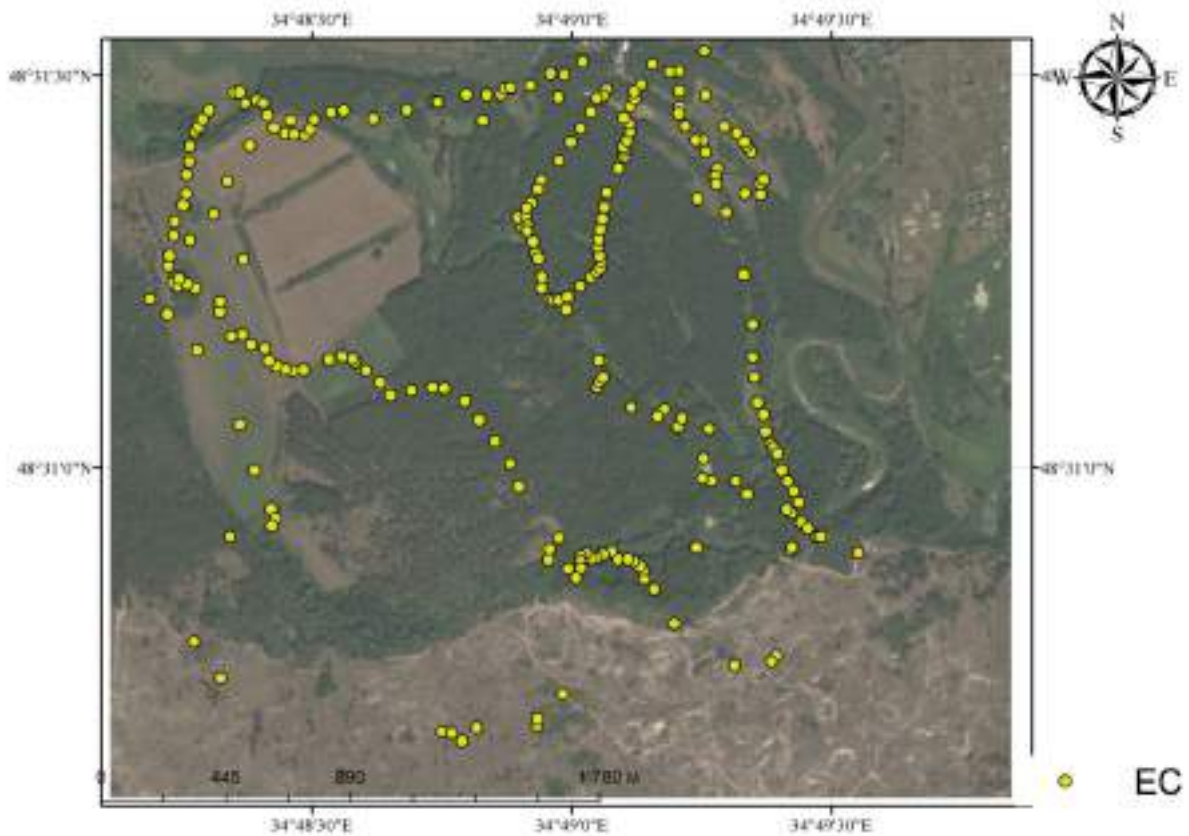


Рис. 2. Розташування точок вимірювань електропровідності в межах дослідженого полігону.

Були зроблені оцінки відповідності спостережуваних розподілів електричної провідності нормального, експоненціального, лог-нормального законам, а також законам гамма, Вейбулла та Парето. Розрахунки проведені за допомогою функції *gofstat* бібліотеки *fitdistrplus* (Delignette-Mulle, Dutang, 2015) мови та середовища для статистичних розрахунків R (R Core Team, 2015). Бутстреп-процедура оцінювання параметрів розподілу Вейбулла та гамма-розподілу здійснена за допомогою функції *bootdist*.

Для приведення експериментальних даних по електропровідності ґрунту до нормального закону розподілу для подальшого застосування трансформованих даних у регресійному аналізі було застосоване перетворення Бокса-Кокса (Box, Cox, 1964):

$$y_i^{(\lambda)} = \begin{cases} \frac{y_i^{(\lambda)} - 1}{\lambda} & \text{якщо } \lambda \neq 0 \\ \ln(y_i) & \text{якщо } \lambda = 0 \end{cases}$$

Результати трансформації суттєво залежать від обраного значення параметру λ . Для його обрання були застосовані методи Шапіро-Уїлка, Андерсона-Дарлінга, Крамера фон Мізеса, Пірсона χ^2 , Шапіро-Франція, Ліллієфорса, Жака-Бера, та метод штучної коваріати (Asar et al., 2014). Відповідні розрахунки проведені за допомогою функції *boxcoxnc* бібліотеки AID (<https://cran.r-project.org/web/packages/AID/index.html>).

Екстраполяція інформації про електропровідність ґрунту на весь досліджений полігон була здійснена за допомогою регресійного аналізу, у якому у якості предикторів виступають екогеографічні змінні, одержані за допомогою даних дистанційного зондування Землі. Ці змінні належать до двох категорій: висота рельєфу та похідні інформаційні шари на основі цифрової моделі рельєфу та вегетаційні та інші індекси на основі знімків з супутника Landsat.

2. Екогеографічні змінні, отримані за допомогою даних дистанційного зондування Землі

Розвиток багатоканальної космічної зйомки та технологій побудови тривимірних моделей рельєфу створюють нові можливості для дослідження зв'язків видів з умовами середовища та оцінки якості місцеперебувань (Пузаченко и др., 2006; Жуков и др., 2011; Демидов и др., 2013; Кунах, Папка, 2016). У нашій роботі використані матеріали з набору інструментів *Operational Land Imager (OLI)*, установленого на супутнику Landsat 8 (Geological Survey (U.S.), and EROS Data Center. 1900. EarthExplorer. [Reston, Va.]: U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey. <http://purl.access.gpo.gov/GPO/LPS82497>). Знімки земної поверхні проведені в рік обліку електричної провідності ґрунту – 16 березня та 4 червня 2015 р.

Мультиспектральні сканери супутників Landsat 8 дозволяють оцінити величину відбитої радіації в смузі довжин хвиль 0,433 – 1,390 мкм із просторовою розрізняючою здатністю 30×30 м на місцевості (знімальні канали 1 – 7, 9) і панхроматичним каналом з дозволом 15×15 м (восьмий знімальний канал), охоплюючи в такий спосіб більшу частину спектра сонячної радіації. Зйомка здійснюється в дев'яти спектральних діапазонах (каналах) (умовні позначки – **B1–B9**), що відповідають основним вікнам прозорості атмосфери, що забезпечує оптимальне відображення енергетичних характеристик для хвиль, довжина яких відповідає максимальному сприйняттю діяльною поверхнею.

За допомогою кокринга з панхроматичним каналом у якості козмінної шари з каналами з роздільною здатністю 30 м перетворені на шари з роздільною здатністю 15 м.

Поряд із прямими призначенням каналів Landsat властивості середовища селективно відбиваються через їх співвідношення (індекси) (Moreno et al., 1999).

Перелік індексів (за Кунах, Папка, 2016).

2.1. Індекс аерозолів-узбережжя (aerosol/coastal) (AC-Index): (B1-B2)/(B1+B2).

Індекс названий по імені каналу B1 – канал узбережжя й аерозолів. Цей канал чутливий до концентрації аерозолів в атмосфері. Іншою важливою властивістю цього каналу є можливість інспекції мілководних прибережних і внутрішніх вод для оцінки опадів, органічної речовини, коралових рифів, планктонів, що містить хлорофіл. Поряд із зазначеними можливостями, цей індекс

може використатися для оцінки щільності деяких типів рослинності, тому що багато рослин мають епікутикулярні воскові покриття, які відбивають шкідливі ультрафіолетові промені (http://surfaceheat.sites.yale.edu/sites/default/files/Coastal%20Aerosol%20Band_1.pdf). У зв'язку з тим, що серед супутників Landsat такий канал з'явився вперше, то фактичних даних по застосуванню цього індексу ще дуже мало.

2.2. Гідротермальний композит (*Hydrothermal Composite*), індекс окислів заліза (*Iron Oxide*) (Hydr):

B4/B2.

2.3. Глинисті мінерали (*Clay Minerals*) (Clay), а також простий індекс ріллі (Simple tillage index – STI):

B6/B7.

Через наступне перетворення може бути отриманий нормалізований диференціальний індекс ріллі (*Normalized Difference Tillage Index* – NDTI) (Van Deventer et al., 1997):

$$NDTI = \frac{STI - 1}{STI + 1}$$

2.4. Нормалізований різницевий індекс рослинності (NDVI):

(B5 – B4)/(B5 + B4).

2.5. Індекс рослинності (VI) ураховує відмінності біомаси та особливості типів рослинності:

(B6 - B7)/(B7 + B6).

2.6. Нормалізований різницевий водний індекс (MNDWI) чутливий до вмісту води в зеленій біомасі:

(B3 - B6)/(B3 + B6).

2.7. Індекс вологості поверхні Землі (*Land Surface Water Index, Normalized Difference Infrared Index* – LSWI):

(B5-B6)/(B5+B6).

2.8. Нормалізоване відношення пожеж (*Normalized Burn Ratio* – NBR):

(B5-B7)/(B5+B7).

2.9. Індекс M15 чутливий до технології обробітку ґрунту та може розглядатися як один з варіантів індексів ріллі (Van Deventer et al., 1997):

(B2-B6)/(B2+B6).

3. Екогеографічні змінні, отримані за допомогою цифрової моделі рельєфу

Для побудови цифрової моделі рельєфу використана інформація з Радарної топографічної місії шаттлів (*Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM) з піксельним дозволом 30 м.

Дозвіл 30 м є придатним для аналізу на дрібно- і середньомасштабних рівнях, але для більш детальних цілей такий дозвіл є дуже грубим. Була проведена інтерполяція цифрової моделі за допомогою кригінгу (Grohmann, 2006) та одержана цифрова модель рельєфу з роздільною здатністю 15 м. Після цієї операції не змінюється рівень деталізації вихідної моделі, але отримана поверхня, де має місце когеренція кутових властивостей (тобто ухилу й аспекту) між сусідніми пікселями (Valeriano et al., 2006), що дуже важливо для кількісного аналізу земної поверхні.

На підставі цифрової моделі рельєфу поряд з висотою над рівнем моря були оцінені наступні геоморфологічні показники, які застосовані як екогеографічні змінні.

Перелік геоморфологічних показників (за Кунах, Папка, 2016).

2.1. Топографічний індекс вологості.

Концепція топографічного індексу вологості (*topographic wetness index* – TWI) вперше була запропонована К. Бівеном і Н. Кіркбі (Beven, Kirkby, 1979). Топографічний індекс вологості обчислюється за формулою:

$$TWI = \ln(a/\tan\beta),$$

де a – дренажна площа (площа водозбору, розрахована на одиницю довжини замикаючого контуру), β – крутість схилу (Moore et al., 1993; Жуков и др., 2011).

2.2. Індекс топографічного положення.

Індекс топографічного положення (*Topographic position index* – TPI) являє собою різницю між абсолютною висотою даної точки (або осередку) і середньою висотою точок у певному буфері навколо вихідної точки. Позитивні значення TPI відповідають опуклостям земної поверхні; негативні – зниженням; значення, близькі до нуля, можуть указувати як на рівнинну поверхню, так і середню частину схилу (Guisan et al., 1999; Демидов и др., 2013).

2.3. Індекс балансу геомаси.

Індекс балансу геомаси (*Mass Balance Index*) розкриває топографічні передумови до руйнування та відкладення ґрунтів. Даний показник дозволяє виявити ділянки з високим ступенем імовірності розвитку обсіпних схлилових процесів (Moeller et al., 2008). Негативні значення індексу вказують на ділянки з нагромадженням геомаси, такі як депресії рельєфу або заплави рік. Позитивні значення вказують на ділянки з високим ступенем ризику ерозійних процесів. Значення індексу, близьке до нуля, указує на ділянки з рівновагою спаду та прибутку геомаси.

2.4. Фактор ерозії LS.

Ерозійний потенціал рельєфу LS є одним з компонентів універсального рівняння ґрунтової ерозії (*Universal Soil Loss Equation* – USLE). LS є добутком L- і S-факторів. L-фактор визначає значення довжини схилу (*slope length*), а S-фактор – крутість схилу (*slope steepness*). Універсальне рівняння ерозійних втрат ґрунту (USLE), або рівняння Уїшмейєра-Сміта, виведене в США як метод розрахунку середньорічних втрат ґрунту на основі узагальнення результатів спостережень на стандартних стокових площадках довжиною 22,13 м з ухилом 9 %, проведених більш ніж на 8000 ділянках в 21 штаті (Митчел, Бубензер, 1984; Лисецкий, Половинко, 2012). У першій редакції USLE для описання впливу крутості схилу застосовували тангенс, а для показника ступеня при довжині схилу – постійну величину, яка дорівнювала 0,5. Пізніше тангенс кута нахилу поверхні замінили на синус, тому що було встановлено, що з допомогою цієї функції вдається більш точно відбити вплив ухилу на схилах крутістю більше 3° (Wischmeier, Smith, 1978). Ерозійні втрати ґрунту набагато більш чутливі до зміни крутості схилів, ніж до зміни довжини, тому вдосконалена модель USLE – RUSLE була спрямована на найточнішу оцінку фактора крутості схилів (McCool et al., 1994; Лисецкий, Половинко, 2012).

2.5. Пряма та розсіяна інсоляція

Пряма та розсіяна інсоляція належать до категорії топокліматичних показників (Boehner, Antonic, 2009). Найбільш відмітні варіації кліматичних патернів виникають через топокліматичні процеси, що відбуваються в прикордонному шарі Землі та мають характеристичну розмірність не більш ніж 10^1 км (мезо β масштаб) і до 10^{-3} км (мікро β масштаб) (масштабні рівні наведені за Orlanski, 1975). Топокліматологія є частиною кліматології, що займається вивченням впливу земної поверхні на клімат. Земна поверхня переважно контролює просторову диференціацію приземних атмосферних процесів і пов'язаних із цим кліматичних варіацій (Boehner, Antonic, 2009). Сонячна радіація, що попадає на земну поверхню, складається із двох складових – короткохвильової та довгохвильової. Для обчислення короткохвильової складової необхідно враховувати оцінку прямої та дифузійної компонент, які попадають на відкриту поверхню з оцінкою всіх ефектів, які викликані топографією поверхні та специфічних для кожного компоненту (Boehner, Antonic, 2009).

2.6. Висота над русловою мережею

Висота над русловою мережею (*Altitude above channel network*), або вертикальна дистанція до руслової мережі (*Vertical Distance to Channel Network* – VDTCN), є різницею між висотою рельєфу та висотою руслової мережі (Olaya, Conrad, 2008) (рис. 3). Є надійним маркером рівня ґрунтових вод і може бути використаний для картографії ґрунтів (Bock, Kothe, 2008).

2.7. Різномасштабний індекс гребенів височин і різномасштабний індекс тальвегів

Алгоритм розрахунку різномасштабного індексу тальвегів (*Multiresolution valley bottom flatness* – MRVBF) ідентифікує тальвеги ґрунтуючись на наступних припущеннях: (1) тальвеги більш виположені та перебувають нижче їхнього оточення; (2) тальвеги виникають у широкому діапазоні масштабів; (3) більші тальвеги є більш плоскими, ніж дрібні (Gallant, Dowling, 2003). Значення індексу менш 0,5 указують на те, що дана територія не є тальвегом. Значення 0,5–1,5 указують на самі круті та малі тальвеги. Більш плоскі та більші за розмірами тальвеги маркуються значеннями індексу більше 2,5.

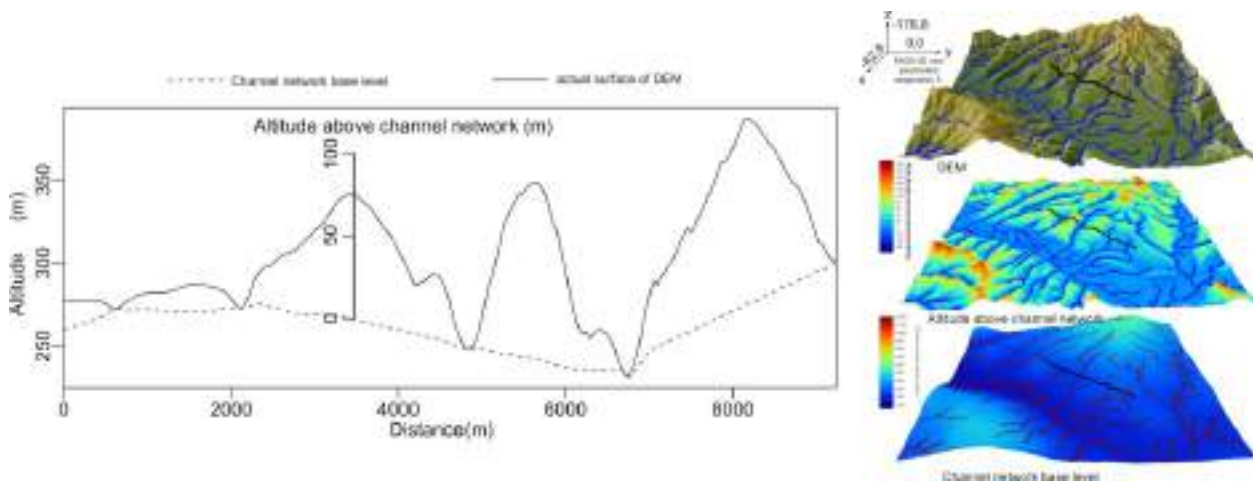


Рис. 3. Схема, що пояснює висоту над русловою мережею (<http://sourceforge.net/p/saga-gis/discussion/790705/thread/32283cc3/>).

Різномасштабний індекс гребенів височин (*Multiresolution ridge top flatness index* – MRRTF) є комплементарним показником попереднього індексу. У більшості клітин растра один з індексів (MRVBF або MRRTF) буде мати значення менше, ніж 0,5, що буде вказувати або на наявність височини, або тальвегу. Якщо обидва індекси мають значення менше 0,5, то в такому випадку ділянка буде віднесена до схилу.

2.8. Векторна міра пересіченості місцевості

Векторна міра пересіченості місцевості (*Vector Ruggedness Measure* – VRM) оцінює дисперсію ортогональних до поверхні рельєфу векторів. Значення VRM мале як для плоскої місцевості, так і для крутої місцевості, але високе для крутої та пересіченої (Sappington et al., 2007). Пересіченість розуміється як негладкість поверхні.

Геоморфологічне різноманіття та різноманіття рослинного покриву

Цифрова модель рельєфу була класифікована на елементи форми рельєфу за алгоритмом Івахаші та Пайка (Iwahashi, Pike, 2007). Випуклість обчислено як відношення (у %) кількості пікселів з позитивною криватиною (випуклі пікселі) до загальної кількості пікселів у межах радіусу з 10 пікселів. Текстуру обчислено як відношення (у %) кількості пікселів, які представляють «піки» або «западни» до загальної кількості пікселів у межах радіусу з 10 пікселів. Класифікацію рослинного покриву по вегетаційним індексам проведено за алгоритмом ітеративної мінімальної дистанції (Forgy, 1965). Процедури проведені в програмі SAGA (Conrad et al., 2015).

Інформацію елементи форми рельєфу та типи рослинного покриву було використано для обчислення відповідного рельєфного та рослинного різноманіття за Шенноном:

$$H = -1 \cdot \sum_{i=1}^N p_i \cdot \log_2 p_i$$

де i – елемент форми рельєфу (тип рослинності) у межах квадрату з стороною 3 пікселя відносно фокального пікселя, p_i – частка елемента рельєфу (типу рослинності) у межах відповідного квадрату, N – кількість форм рельєфу (типів рослинності) у межах відповідного квадрату. Обчислення проведені за допомогою програми Fragstats 3.3 (McGarigal et al., 2002).

Змішаний аналіз відповідностей (*Mixed correspondence analysis*), який є розширенням аналізу головних компонент для континуальних та категоріальних змінних (Hill, Smith, 1976), виконано за допомогою функції `dudi.mix` бібліотеки `ade4` (Dray, Dufour, 2007).

РЕЗУЛЬТАТИ

У результаті проведених досліджень нами встановленні значення електричної провідності ґрунту в межах досліджуваного полігону (табл. 1).

Таблиця 1. Статистичні характеристики електропровідності ґрунту (в дСм/м) (N = 241)

Показник	Середня ±ст. помилка	Мінімум	Максимум	Довірчий інтервал		CV, %
				2,5 %	97,5 %	
EC _d	0.068±0.002	0.000	0.200	0.013	0.127	50.75
EC _w	0.267±0.014	0.010	1.200	0.010	0.822	83.55

Умовні позначки: EC_d – електрична провідність ґрунту в умовах природної вологості; EC_w – у стані повної вологоємності.

Аналіз даних, наведених в табл. 1 свідчить про те, що у середньому електрична провідність ґрунту становить 0.068±0.002 дСм/м. За умов попереднього зволоження зразків ґрунту електрична провідність ґрунту демонструє значно вищі показники та становить 0.267±0.014 дСм/м. Між цими показниками існує статистично вірогідний позитивний зв'язок – $r = 0.41$, $p = 0.00$. Середні значення електричної провідності ґрунту відрізняються статистично (непараметричний критерій знаків для спостережуваних значень $Z = 11.85$, $p = 0.00$).

Коливання електричної провідності ґрунту в природному стані знаходяться в діапазоні 0.000–0.200 дСм/м. Такий діапазон для попередньо зволоженого ґрунту становить 0.010–1.200 дСм/м. Слід відзначити, що рівні варіації досліджуваної величини у природних умовах та при попередньому зволоженні ґрунту значно відмінні. Про це свідчить коефіцієнти варіації, які становлять 50.75 та 83.55 % відповідно.

Як відмічає В. П. Самсонова (2008), знання законів розподілу показників ґрунтових властивостей необхідне не тільки для обґрунтованого застосування статистичних процедур, але й для більш глибокого розуміння законів ґрунтоутворення. Гістограма є важливим способом для представлення статистичної інформації. Аналіз гістограми (рис. 4) та відповідних статистик та критеріїв (табл. 2) свідчить про те, що показники електричної провідності ґрунту в стані польової вологості можуть бути описані нормальним законом розподілу (статистики Колмогорова-Смірнова 0,05, $p = n.s.$, Лілієфорса – $p < 0,15$, $\chi^2 = 15,64$, $p = 0,01$). Також одержані дані можуть бути апроксимовані розподілами Вейбулла та гамма-розподілом.

Розподіл значень електричної провідності ґрунту в стані повної вологоємності більшою мірою підкоряється законам Вейбулла або гамма-розподілу.

Оцінки параметрів розподілу Вейбулла та гамма-розподілу наведені в табл. 3. Очевидно, що електропровідність ґрунту при різних рівнях вологості відрізняється не тільки за абсолютними значеннями, але також за характером статистичного розподілу. Параметр масштабу гамма-розподілу має значення, яке перевищує 10, за яких гамма-розподіл наближається до нормального закону.

За рядом критеріїв оптимальним показником трансформації Бокса-Кокса для даних електропровідності ґрунту при повній насиченості вологою становить 0,42 (рис. 5). Трансформовані дані відповідають нормальному закону розподілу (статистики Колмогорова-Смірнова 0,06, $p = n.s.$, Лілієфорса – $p < 0,05$, $\chi^2 = 15,93$, $p = 0,04$) і таким чином можуть бути застосовані для проведення параметричних методів статистичного аналізу.

Для описання варіювання показників електричної провідності були застосовані екогеографічні показники, які відображають рельєфні особливості місцевості (деякі з них наведені на рис. 6) та особливості рослинного покриву, відображених за допомогою вегетаційних індексів (деякі з них наведені на рис. 7).

Висота рельєфу у межах дослідженого полігону варіює в діапазоні 50.4–69.8 м. Для розподілу висот властива наявність двох максимумів – 56,2 та 66,9 м. Ухил варіює в діапазоні 0–9° з середнім значенням 1.7° та медіанним 0.7°. Топографічний індекс вологості TWI варіює в межах 5.3–13.2, що свідчить про значний діапазон умов зволоження ґрунту в межах дослідженого полігону. Індекс топографічного положення (ТPI) варіює в межах від –1.5 до 1.5. Це відповідає у цілому еоловому рельєфу дослідженої місцевості, який властивий аренам річок. Індекс балансу геомаси свідчить про наявність ділянок з нагромадженням геомаси (від'ємні значення від –0.18 до 0) та ділянок з ризиком ерозійних процесів (позитивні значення до 0.18. Зони накопичення геомаси найбільшою мірою

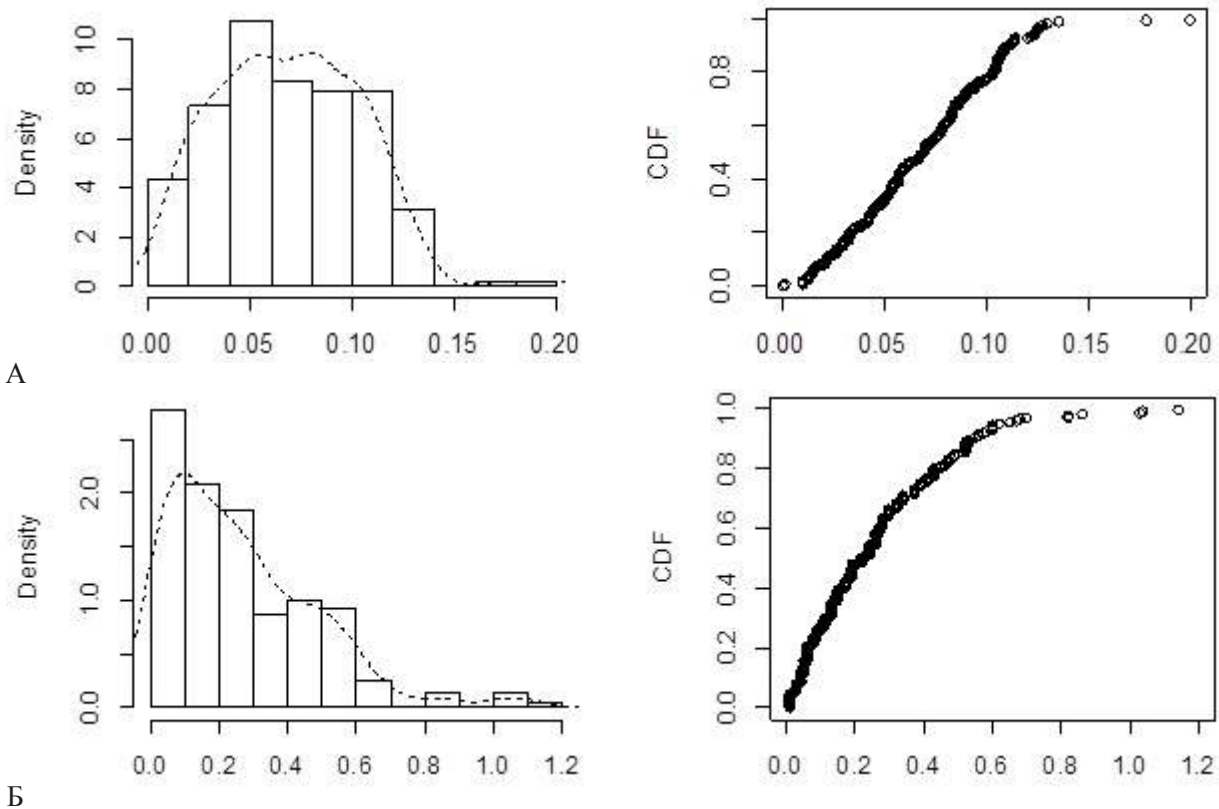


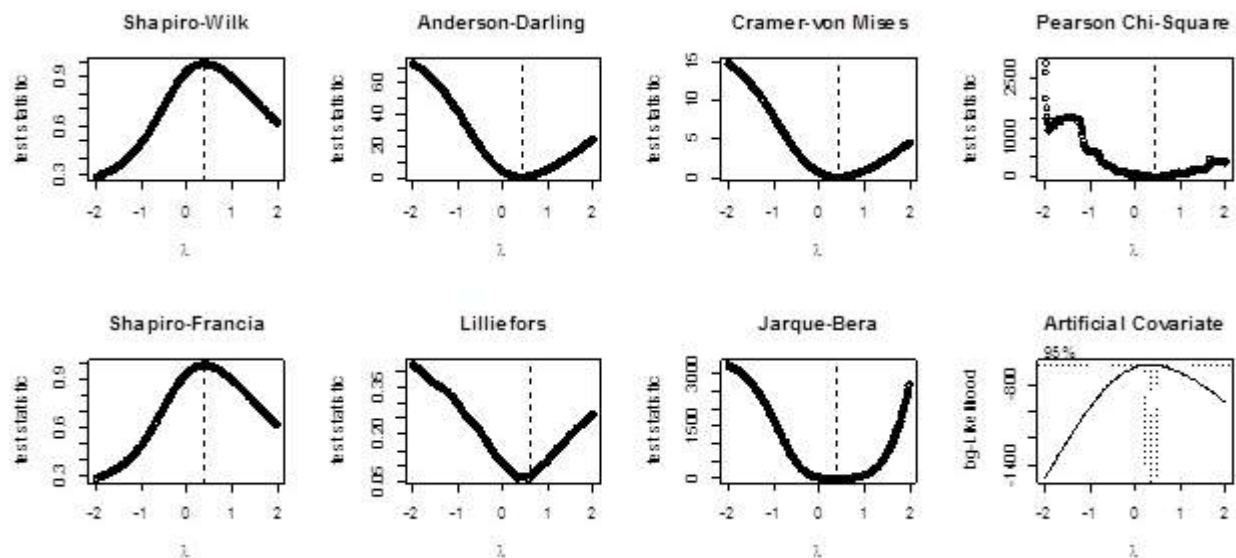
Рис. 4. Розподіл значень електропровідності ґрунту. А – ґрунт у стані польової вологості; В – ґрунт у стані повної вологості; вісь абсцис – значень електропровідності (дСм/м); вісь ординат гістограми – густина спостережень (*Density*), CDF – інтегральна функція розподілу (*cumulative distribution function*).

Таблиця 2. Статистики та критерії відповідностей електропровідності ґрунту законам розподілу

Методи або критерії	Зако́ни розподілу					
	Нормальний	Експоненціальний	Вейбулла	Гамма	Лог-нормальний	Парето
ґрунт у стані польової вологості						
Статистики відповідностей розподілам						
Колмогорова-Смірнова	0.05	0.22	0.07	0.09	0.12	0.22
Крамера фон Мізеса	0.15	4.43	0.23	0.56	1.25	4.43
Андерсона-Дарлінга	1.15	23.50	1.56	3.34	7.38	23.51
Критерії відповідностей розподілам						
Аїкаке	-933.38	-809.41	-940.20	-916.04	-841.88	-807.41
Байеса	-926.41	-805.92	-933.23	-909.07	-834.91	-800.44
ґрунт у стані повної вологості						
Статистики відповідностей розподілам						
Колмогорова-Смірнова	0.12	0.09	0.06	0.07	0.11	0.09
Крамера фон Мізеса	0.87	0.42	0.11	0.15	0.68	0.42
Андерсона-Дарлінга	5.59	2.49	0.81	1.00	4.34	2.49
Критерії відповідностей розподілам						
Аїкаке	-53.30	-157.58	-166.88	-164.98	-125.87	-155.58
Байеса	-46.33	-154.10	-159.92	-158.01	-118.90	-148.61

Таблиця 3. Бутстреп-оцінки параметрів розподілів електропровідності ґрунту

Параметри	Вейбулла			Гамма		
	Медіана	2.50%	97.50%	Медіана	2.50%	97.50%
Ґрунт у стані польової вологості						
Форми	2.03	1.84	2.24	2.81	2.40	3.35
Масштабу	0.08	0.07	0.09	41.39	34.75	49.85
Ґрунт у стані повної вологоємності						
Форми	1.20	1.08	1.32	1.31	1.11	1.54
Масштабу	0.28	0.25	0.31	4.96	4.09	6.03

Рис. 5. Оцінка оптимального параметру λ для перетворення Бокса-Кокса.

відповідають тальвегу балки Орлової та заплаві р. Проточі, а зони ризику ерозійних процесів знаходяться на схилі балки Орлової. Подібна конфігурація властива для просторового варіювання фактору ерозії LS. Цей показник змінюється у межах від 0 до 0.72. Пряма інсоляція варіює від 1044.6 до 1109.4 КВт*год/м², а дифузна інсоляція – 239.7–240.4 КВт*год/м². У гістограмі розподілу остатнього показника наявні два максимуми – 240 та 240.3 КВт*год/м². Мінімум дифузної інсоляції спостерігається на схилі північно-східної експозиції балки Орлової та у зоні контакту піщаного степу на арені та лісових насаджень. Максимум дифузної інсоляції властивий безлісним просторам у заплаві р. Проточі.

Висота над русловою мережею є досить умовним показником глибини ґрунтових вод особливо за умов переважно піщаних ґрунтоутворних порід у межах арени р. Дніпро. Тим не менш, цей показник також відображає варіабельність екологічних умов, обумовлену рельєфом. Цей показник змінюється від 0 до 1.1 м з медіанним значенням 0.12 м.

Статистичний розподіл значень різномасштабного індексу гребенів височин і різномасштабного індексу тальвегів мають багатовершинний «пилчастий» характер, значно відмінний від нормального розподілу та такий, що не може бути трансформований до нормального розподілу. Це робить неможливим застосування цих показників у статистичних розрахунках для визначення зв'язку з іншими показниками. Ці індекси мають самостійне значення, яке відповідає їхнім назвам.

Розподіл значень векторної міри пересіченості місцевості найбільшою мірою може бути описаний експоненціальним законом. Цей показник чітко ідентифікує ділянки дослідженого полігону з пересіченими «негладкими» поверхнями, для яких властиве значне варіювання екологічних умов.

У просторовому аспекті такі ділянки найбільш характерні для узлісних місцеперебувань – схилу балки Орлової, зони контакту лугових та лісових угруповань в заплаві р. Проточі, а також у зоні

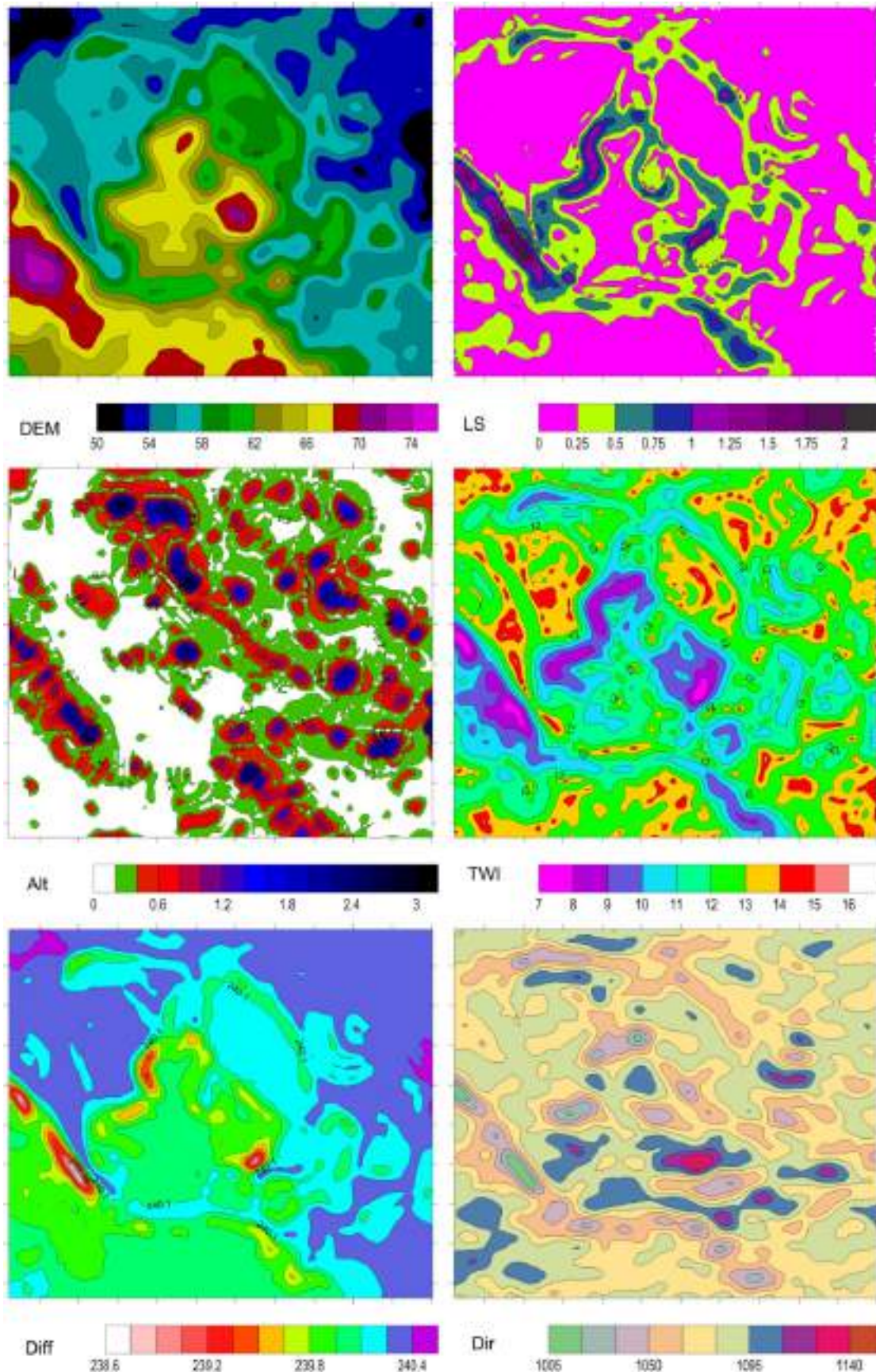


Рис. 6. Цифрова модель рельєфу та просторове варіювання похідних інформаційних шарів.
Умовні позначки: DEM – цифрова модель рельєфу, м; TWI – топографічний індекс вологості; Diff – дифузний та Dir – пряма інсоляція (з 10 квітня по 30 серпня 2015 р., в КВт*год/м²).

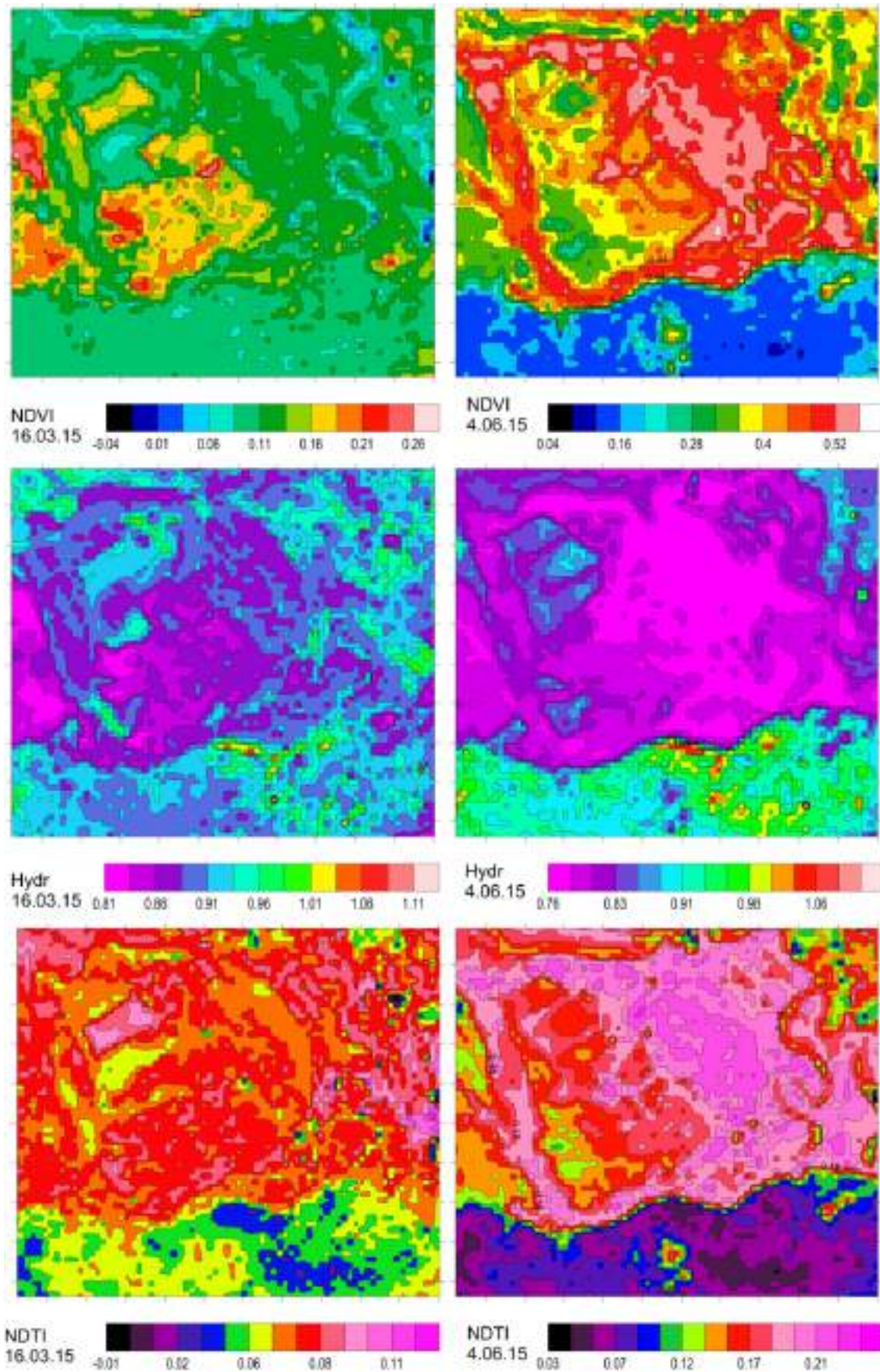


Рис. 7. Просторове варіювання індексів, одержаних на основі знімків з супутника Landsat 16 березня та 4 червня 2015 р.

контакту піщаного степу та лісу. Слід відзначити, що переважна більшість лісових насаджень у межах дослідженого полігону має штучне походження. Досить чітка відповідність узлісь геоморфологічним утворенням свідчить про те, що стійки штучні лісові насадження формуються там, де раніше вірогідно існували природні лісові угруповання, тобто в умовах геоморфологічної відповідності. Штучні лісові насадження, сформовані в неприродних місцях зникли внаслідок пожеж.

Були застосовані знімки поверхні Землі для обрахування вегетаційних індексів, зроблені ранньою весною та влітку для більш чіткої диференціації хвойного та широколистяного лісових біогеоценозів. Також ранньою весною при незначному рівні розвитку рослинного покриву більш чітко можуть бути відображені особливості ґрунтового покриву за допомогою таких індексів, як індекс глинистих мінералів, LSWI, NBR, M15.

Розглянуті показники рельєфу та вегетаційні та інші індекси мають характер континуальних змінних. За допомогою класифікаційних процедур вони можуть бути перетворені у категоріальні змінні, які позначають якісні стани ландшафтного покриву – елементарні форми рельєфу та типи рослинного покриву. Саме ці категоріальні змінні є основою для обчислення показників ландшафтно-екологічного різноманіття.

В основі виділення форм рельєфу за Івахаші та Пайком (Iwahashi, Pike, 2007) знаходиться концепція геометричної сигнатури, яка поєднує три властивості рельєфу: градієнт схилу, вгнутість поверхні та текстура. Різне поєднання цих ознак надає можливості виділяти 8, 12 або 16 типів елементів рельєфу (рис. 8). Цифрова модель рельєфу була класифікована з виділенням 16 типів елементів рельєфу (табл. 4). Кожному типу рельєфу відповідають певні рівні геоморфологічних характеристик, власне за якими ці типи встановлені – нахил, текстура та випуклість.

Таблиця 4. Типи елементів рельєфу за Івахаші та Пайком та їх характеристики у межах дослідженого полігону

№	Типи елементів рельєфу	Частка площі, %	Нахил, °	Текстура	Випуклість
1	Малий ухил, груба текстура, мала випуклість	3.55	0.38	40.39	42.42
2	Малий ухил, тонка текстура, мала випуклість	3.33	0.33	51.49	44.65
3	Малий ухил, груба текстура, значна випуклість	2.80	0.37	40.10	56.93
4	Малий ухил, тонка текстура, значна випуклість	4.62	0.32	51.75	54.89
5	Дуже значний ухил, груба текстура, мала випуклість	13.33	2.97	34.80	43.73
6	Значний ухил, груба текстура, мала випуклість	10.43	1.29	39.02	43.56
7	Помірний ухил, груба текстура, мала випуклість	5.48	0.72	40.43	43.04
8	Дуже значний ухил, тонка текстура, мала випуклість	7.20	2.47	43.83	44.47
9	Значний ухил, тонка текстура, мала випуклість	4.84	1.23	47.27	44.51
10	Помірний ухил, тонка текстура, мала випуклість	3.01	0.69	50.69	45.32
11	Дуже значний ухил, груба текстура, значна випуклість	16.02	3.13	34.95	56.39
12	Значний ухил, груба текстура, значна випуклість	9.03	1.30	38.59	56.70
13	Помірний ухил, груба текстура, значна випуклість	4.30	0.73	39.76	56.75
14	Дуже значний ухил, тонка текстура, значна випуклість	4.84	2.46	43.05	54.81
15	Значний ухил, тонка текстура, значна випуклість	3.87	1.18	47.65	53.88
16	Помірний ухил, тонка текстура, значна випуклість	3.33	0.70	50.75	55.38

Домінуючими за площею елементами рельєфу є № 11 (для типів немає скорочених назв, тому будемо посилатися на них за нумерацією в табл. 4) (16.02 %), № 5 (13.33 %) та № 6 (10.43 %). Загальними особливостями для цих типів є груба текстура та мала або значна випуклість. Ці типи рельєфу відповідають зоні контакту урочищ арени р. Дніпро з урочищами заплави р. Проточі та балкою Орловою. Необхідно відмітити, що вказані елементарні типи рельєфу у просторі розташовані взаємно скоординовано що свідчить про те, що вони складають разом відповідні форми мезорельєфу місцевості – арену з еоловими горбами та балка і заплава.

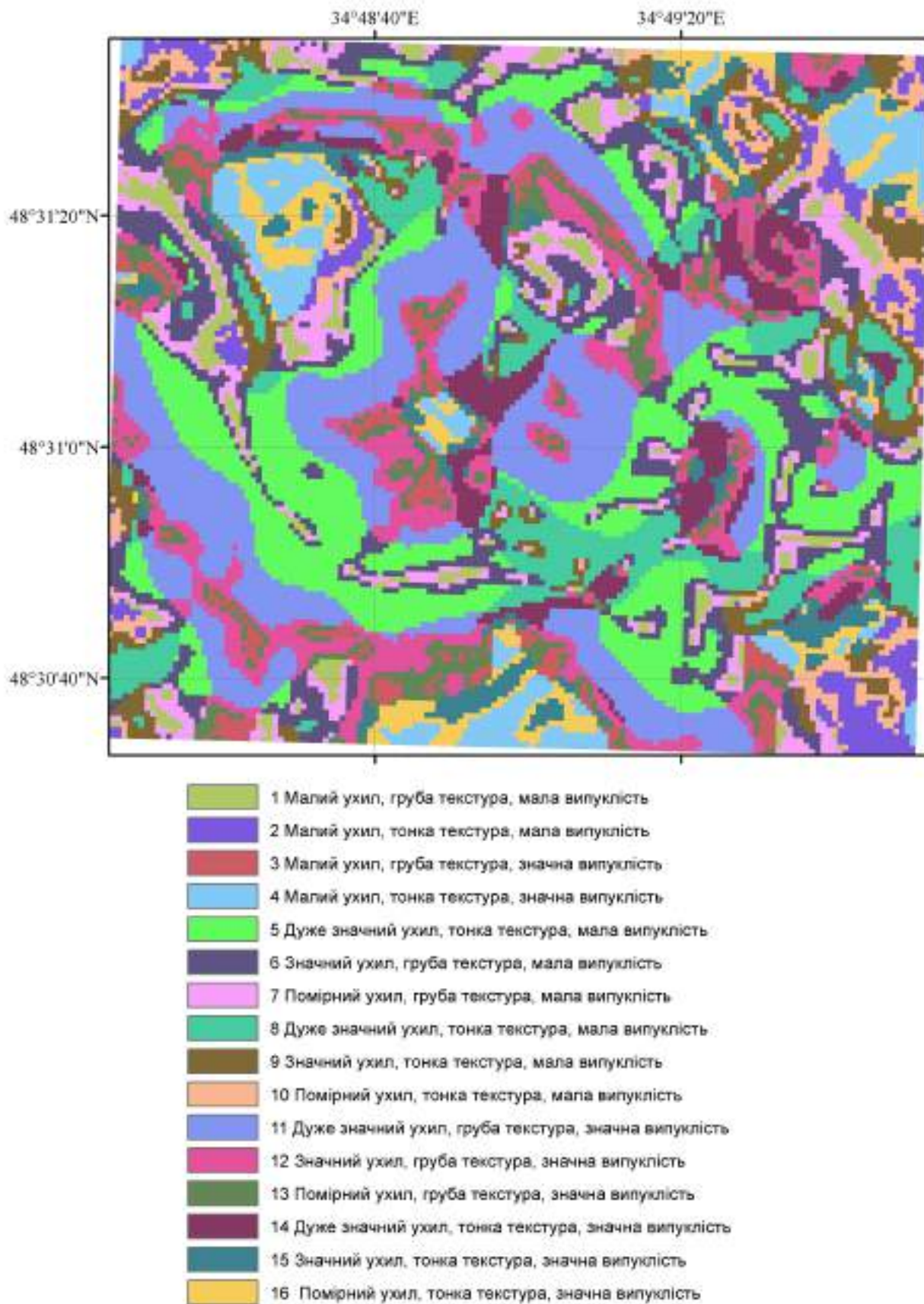


Рис. 8. Класифікація форм рельєфу за Івахаші та Пайком (Iwahashi, Pike, 2007).

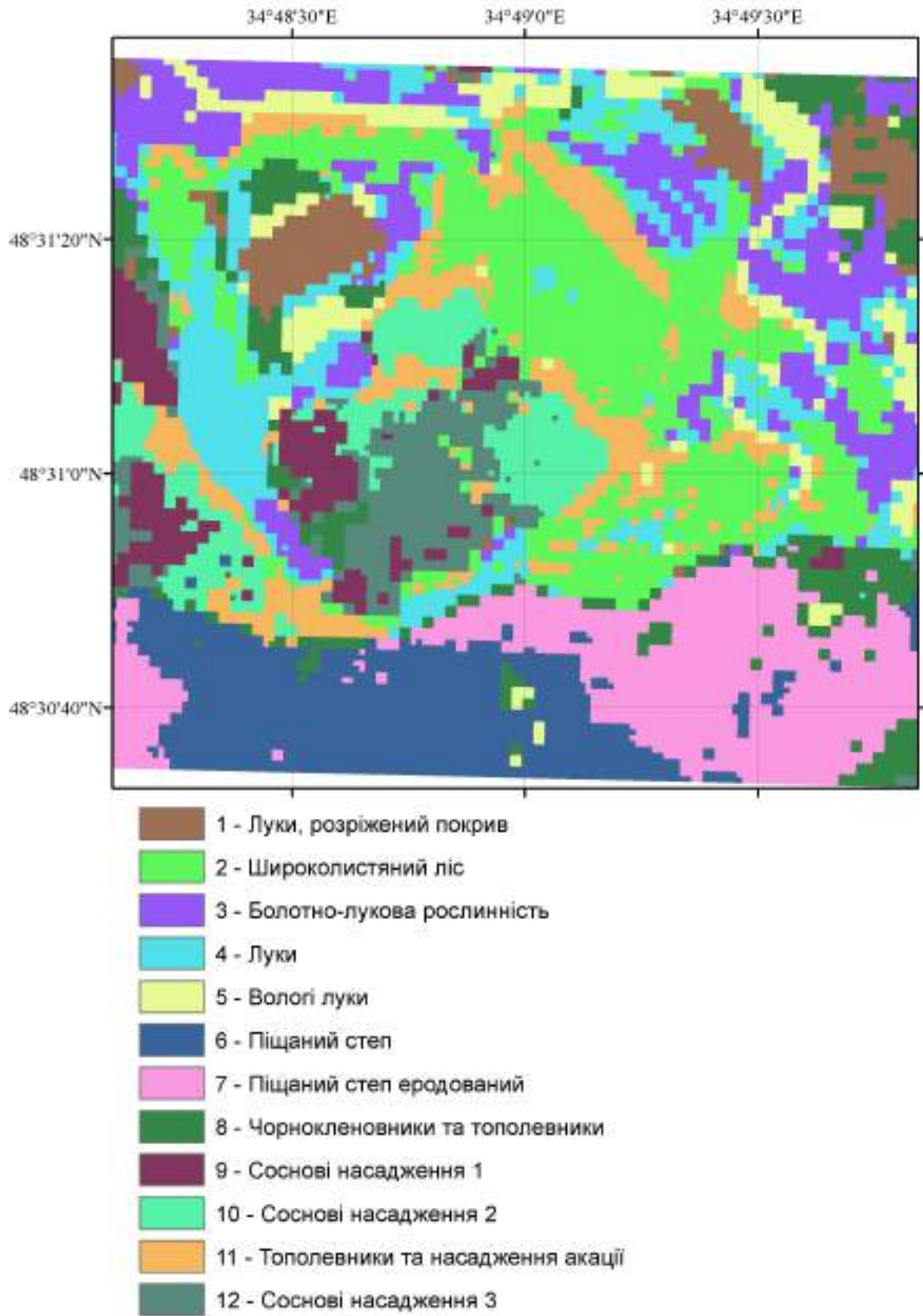


Рис. 9. Типи рослинного покриву за даними дистанційного зондування Землі.

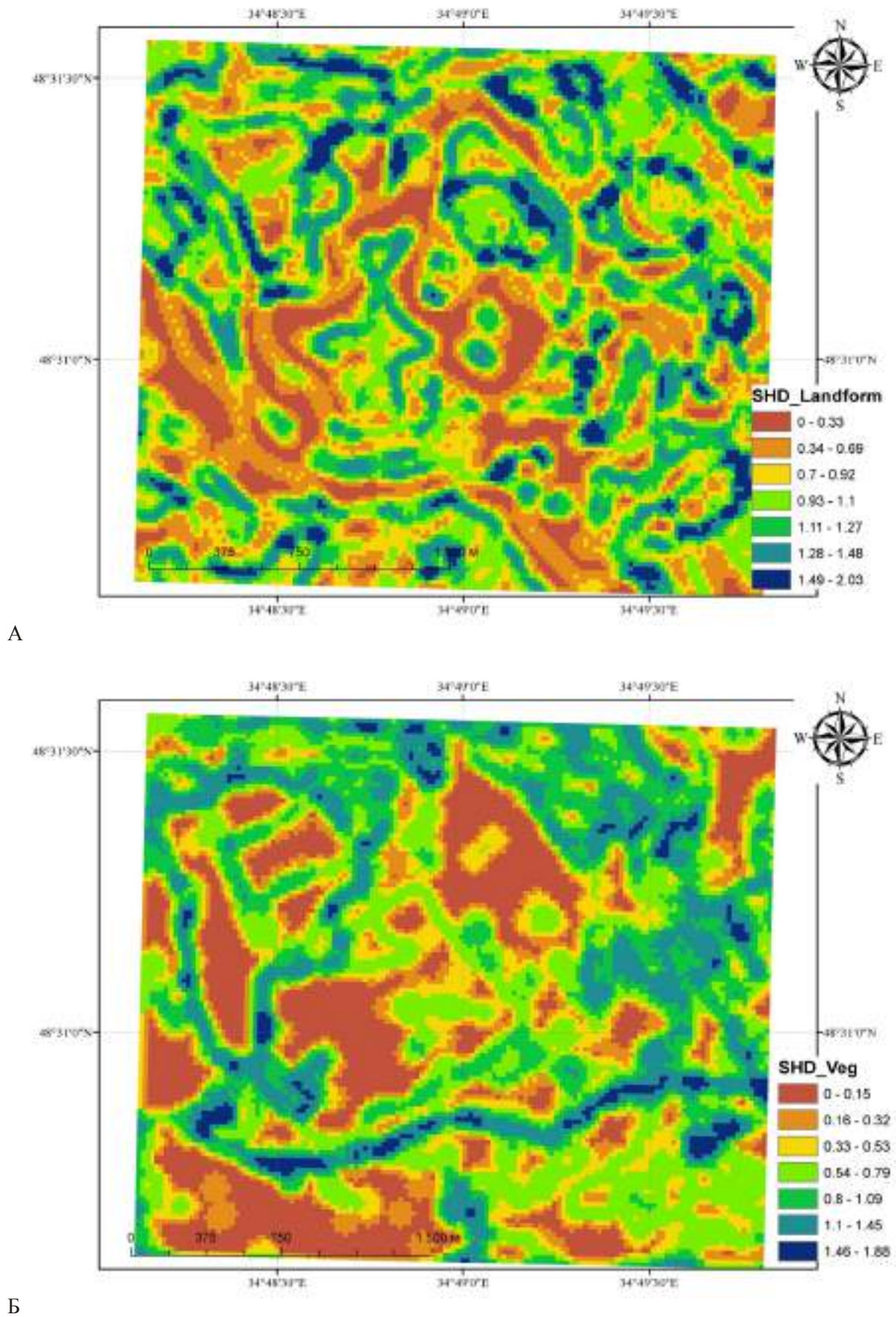


Рис. 10. Індекс різноманіття форм рельєфу (А) та рослинного покриву (В) за Шенноном.

Класифікація поверхні Землі на основі вегетаційних та інших індексів Landsat дозволили виокремити 12 типів рослинного покриву (рис. 9). На основі елементарних форм рельєфу та типізації рослинного покриву були встановлені показники рельєфного різноманіття та різноманіття рослинного покриву, які можна розглядати у якості аспектів ландшафтно-екологічного різноманіття (рис. 10).

Розглянутих змінних значна кількість, вони представлені як категоріальними (фактори), так і континуальними (кількісними) змінними, а також ці змінні переважно мільтіколінеарні, або взаємопов'язані. Остання обставина обумовлена математичними причинами – усі геоморфологічні змінні є похідними від цифрової моделі рельєфу, тобто є наслідком певних математичних обчислень з даними по висоті рельєфу. Вегетаційні індекси також тільки умовно відображають певні особливості, але у кінцевому результаті вони усі віддзеркалюють властивості рослинного покриву як цілісного утворення, чим обумовлено кореляція між вегетаційними індексами. Завдання зниження розмірності простору, в якому відображається досліджуване явище, а також інтеграції категоріальних та континуальних змінних з одержанням взаємно нескорельованих змінних може бути вирішене за допомогою змішаного аналізу відповідностей (Hill, Smith, 1976). Кількість канонічних осей, які залишені для подальшого аналізу, встановлено за критерієм «кам'янистої осипи» Д. Кеттела (Cattell, 1966). На графіку (рис. 11) власних чисел встановлюється місце різкого перегину («осипу»), яке відповідає необхідній кількості канонічних осей (або головних компонент).

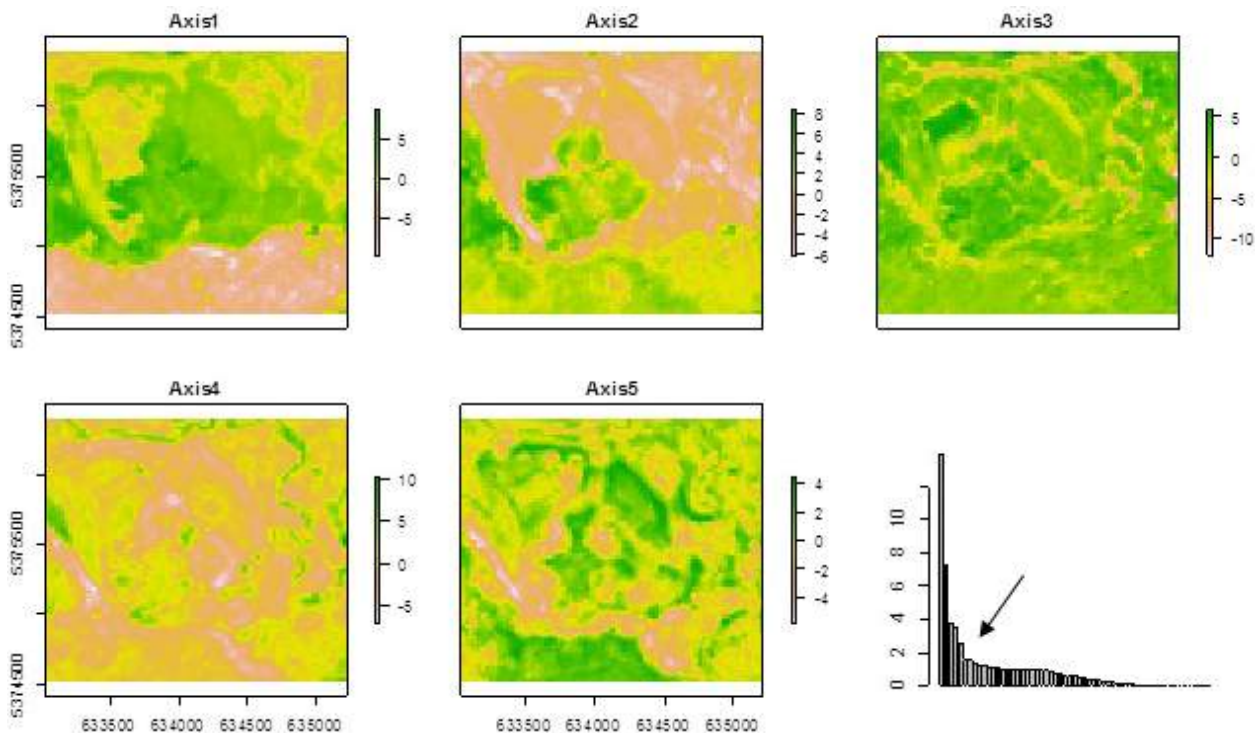


Рис. 11. Ранжовані значення власних чисел канонічних осей та просторове варіювання перших п'ятьох канонічних осей. Стрілка вказує на місце різкого перегину послідовності власних значень.

Встановлено, що для подальшого аналізу можуть бути залишені п'ять канонічних осей. Вони разом пояснюють 53.7 % загальної інерції простору ознак.

Канонічна ось 1 пояснює 24.1 % інерції. Вона характеризується позитивними навантаженнями змінних, які характеризують різні типи лісових (соснових та широколистяних) насаджень та негативними, які характеризують піщаний степ, лугові, болотні та чорнокленовники та тополевики (табл. 5). Найбільшим позитивним факторним навантаженням характеризується елементарна форма рельєфу з дуже значним ухилом, грубою текстурою та значною випуклістю, а найбільшим негативним – з малим ухилом, тонкою структурою та малою випуклістю. Канонічна ось 1 позитивно корелює з індексом різноманіття рослинного покриву ($r = 0.30$, $p = 0.00$) та негативно з індексом рельєфного різноманіття ($r = -0.14$, $p = 0.00$).

Канонічна ось 2 пояснює 12.5 % інерції. Ця ось протиставляє соснові насадження (1, 2 та 3) та болотно-лукову рослинність та луки. Болотно-луковим та луковим угрупованням найбільшою мірою відповідає елементарні типи рельєфу з малим або помірним ухилом, грубою текстурою та малою випуклістю. Канонічна ось 2 негативно корелює з індексом різноманіття рослинного покриву ($r = -0.19, p = 0.00$) та з індексом рельєфного різноманіття ($r = -0.30, p = 0.00$).

Таблиця 5. Навантаження типів рослинного покриву, елементарних форм рельєфу, висоти рельєфу та похідних показників та вегетаційних індексів Landsat на головні осі змішаного аналізу відповідностей

Змінні	Канонічні осі				
	CA1	CA2	CA3	CA4	CA5
Типи рослинного покриву та його різноманіття*					
Veg_1	-0.09	-0.30	0.84	0.03	-0.09
Veg_2	0.19	-0.28	0.11	-0.26	0.40
Veg_3	-0.06	-0.50	0.30	-0.11	-0.46
Veg_4	0.07	-0.31	-0.21	0.29	-0.16
Veg_5	0.04	-0.09	-1.11	0.92	0.23
Veg_6	-0.36	0.34	-0.07	-0.15	0.70
Veg_7	-0.43	0.23	0.00	-0.02	-0.48
Veg_8	-0.13	0.04	0.08	0.23	-0.10
Veg_9	0.44	0.76	0.69	0.72	-0.67
Veg_10	0.32	0.52	0.06	-0.57	0.14
Veg_11	0.23	0.00	-0.70	-0.58	-0.12
Veg_12	0.28	0.42	0.49	0.41	0.05
SHDI_veg	0.08	-0.07	-0.13	0.02	-0.17
Елементарні форми рельєфу та його різноманіття*					
LandForm_1	-0.05	-0.24	0.03	0.45	0.02
LandForm_2	-0.16	-0.13	-0.06	0.57	-0.06
LandForm_3	-0.04	0.13	0.20	0.11	0.81
LandForm_4	-0.15	-0.09	0.30	0.15	0.31
LandForm_5	0.04	0.01	-0.29	-0.13	-0.73
LandForm_6	-0.02	-0.17	0.00	0.30	-0.12
LandForm_7	-0.06	-0.21	-0.02	0.39	0.05
LandForm_8	-0.03	-0.06	-0.03	-0.16	-0.29
LandForm_9	-0.07	-0.17	0.10	0.25	-0.16
LandForm_10	-0.14	-0.18	-0.01	0.47	-0.11
LandForm_11	0.16	0.30	-0.15	-0.55	-0.11
LandForm_12	0.03	0.12	0.15	-0.07	0.67
LandForm_13	-0.01	0.10	0.20	0.05	0.90
LandForm_14	0.10	-0.03	0.01	-0.22	-0.04
LandForm_15	-0.08	-0.05	0.25	0.07	0.29
LandForm_16	-0.14	-0.02	0.31	0.13	0.37
SHDI_Landform	-0.04	-0.11	0.10	0.20	0.26
Висота рельєфу та її похідні показники*					
dem	0.01	0.28	0.04	-0.17	0.20
twi	-0.12	-0.19	0.08	0.30	0.13

wind	0.06	0.18	0.08	-0.22	0.36
alt	0.05	0.01	-0.05	-0.20	0.07
ls	0.07	0.10	-0.18	-0.26	-0.33
tpi	0.04	0.12	0.09	-0.20	0.32
diff_insol	-0.06	-0.25	0.08	0.29	0.06
dir_insol	-0.04	-0.05	0.22	0.13	0.13
Вегетаційні та інші індекси, одержані на основі зйомки з супутнику Landsat**					
ac_04_06	0.24	-0.12	-0.04	-0.01	0.09
ac_16_03	0.20	0.13	-0.12	0.13	0.12
chlor_a_04_06	0.20	-0.21	0.00	-0.14	0.06
chlor_a_16_03	0.13	0.11	0.39	-0.01	-0.14
gr_ndvi_04_06	0.20	-0.22	0.01	-0.12	0.04
gr_ndvi_16_03	0.10	0.06	0.44	-0.06	-0.16
hydr_04_06	-0.24	0.12	0.05	0.01	-0.08
hydr_16_03	-0.19	-0.17	0.11	-0.14	-0.11
m15_04_06	0.22	0.07	-0.11	0.16	0.00
m15_16_03	0.19	0.19	-0.16	0.19	0.02
mndw_04_06	0.22	0.05	-0.10	0.17	-0.05
mndw_16_03	0.18	0.20	-0.14	0.19	0.00
nbr_04_06	0.23	-0.18	-0.01	-0.06	0.02
nbr_16_03	0.22	0.14	0.13	0.12	-0.09
ndb4b3_04_06	0.23	-0.18	-0.02	-0.03	0.03
ndb4b3_16_03	0.17	0.23	-0.01	0.15	0.04
ndti_04_06	0.21	-0.22	0.01	-0.09	0.04
ndti_16_03	0.16	-0.16	0.22	0.00	-0.07
ndvi_04_06	0.21	-0.21	0.00	-0.10	0.04
ndvi_16_03	0.15	0.14	0.35	0.01	-0.12
lswi_04_06	0.23	-0.17	-0.02	-0.05	0.02
lswi_16_03	0.20	0.20	0.08	0.14	-0.08

* – порядок типів рельєфу та рослинності відповідають порядку на рисунках 7 та 8; ** – скорочення індексів – див. «Матеріали та методи».

Канонічна ось 3 пояснює 6.5 % інерції. Ця ось протиставляє соснові насадження 1 таким типам рослинності, як вологі луки, луки з розрідженим покривом, тополевики, насадження акації та соснові насадження 3. Соснове насадження 1 пов'язане з елементарними формами рельєфу, в яких малий або помірний ухил, тонка текстура та значна випуклість. Комплекс протилежних за цією віссю типів рослинного покриву пов'язаний з формами рельєфу, у яких дуже значний ухил, тонка текстура та значна випуклість. Канонічна ось 3 негативно корелює з індексом різноманіття рослинного покриву ($r = -0.25$, $p = 0.00$) та позитивно – з індексом рельєфного різноманіття ($r = 0.19$, $p = 0.00$).

Канонічна ось 4 пояснює 6.1 % інерції. Ця ось протиставляє вологі луки та соснові насадження 1 таким рослинним угрупованням, як соснові насадження 2 та тополевики і насадження акації. Соснове насадження 1 та вологі луки пов'язані з елементарними формами рельєфу, в яких малий або помірний ухил, груба або тонка текстура та мала випуклість. Комплекс протилежних за цією віссю типів рослинного покриву пов'язаний з формами рельєфу, у яких дуже значний ухил, груба текстура та значна випуклість. Канонічна ось 4 характеризується дуже малим коефіцієнтом кореляції з індексом різноманіття рослинного покриву ($r = 0.04$, $p = 0.00$) та значним позитивним коефіцієнтом кореляції з індексом рельєфного різноманіття ($r = 0.39$, $p = 0.00$).

Канонічна ось 5 пояснює 4.5 % інерції. Ця ось протиставляє піщаний степ таким типам рослинності, як соснові насадження 1, піщаний степ еродований та болотно-лукова рослинність. Піщаний степ пов'язаний з елементарними формами рельєфу, в яких малий або помірний ухил, груба текстура та значна випуклість. Комплекс протилежних за цією віссю типів рослинного покриву пов'язаний з формами рельєфу, у яких дуже значний ухил, тонка текстура та мала випуклість. Канонічна ось 5 негативно корелює з індексом різноманіття рослинного покриву ($r = -0.27, p = 0.00$) та позитивно – з індексом рельєфного різноманіття ($r = 0.41, p = 0.00$).

Канонічні осі було застосовано у якості предикторів у лінійній регресійній моделі для прогнозування значень електричної провідності ґрунту (табл. 6).

Таблиця 6. Регресійний аналіз залежності електричної провідності ґрунту від канонічних осей

Предиктори	ґрунт у стані польової вологості, $R^2 = 0.21$			ґрунт у стані повної вологоємності, $R^2 = 0.35$		
	Коефіцієнт±ст. помилка	Рівень вірогідності	Код	Коефіцієнт±ст. помилка	Рівень вірогідності	Код
Константа	0.055±0.003	0.000	***	-1.388±0.037	0.000	***
CA1	0.004±0.001	0.000	***	0.063±0.011	0.000	***
CA2	-0.003±0.001	0.009	**	-0.113±0.014	0.000	***
CA3	-0.004±0.001	0.003	**	-0.048±0.016	0.004	**
CA4	-0.005±0.001	0.000	***	-0.016±0.016	0.316	–
CA5	0.002±0.001	0.124	–	-0.064±0.017	0.000	***

коди статистичної вірогідності – ‘***’ – <0.001 ; ‘**’ – <0.01 .

Обрані предиктори здатні пояснити 21 % варіабельності електричної провідності ґрунту в стані польової вологості та 35 % – у стані повної вологоємності. Якісний аспект регресійних моделей для двох способів вимірювання електричної провідності значно подібний. Відмінності полягають в тому, що для стану польової вологості статистично не вірогідним є вплив вісі 5, а для повної вологоємності – вісі 4.

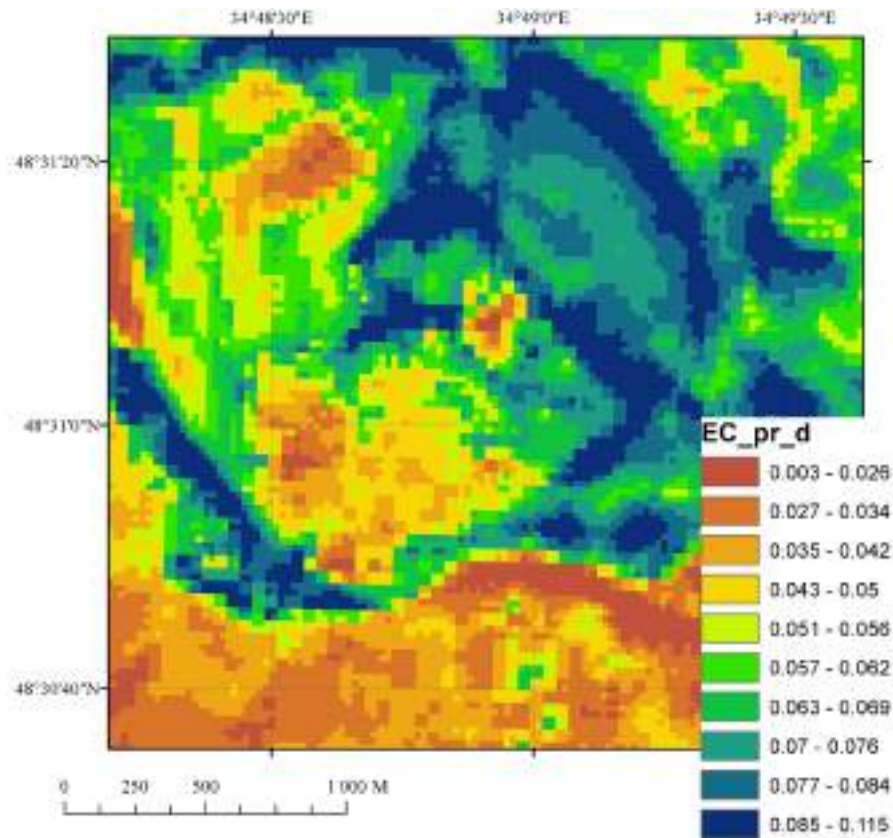
Одержані моделі є основою для прогнозування просторової мінливості електричної провідності ґрунту в межах всього дослідного полігону на основі інформацію про просторове варіювання змінних-предикторів (рис. 12). Для регресійної моделі електричної провідності ґрунту в стані повної вологоємності після прогнозування було здійснене зворотне перетворення Бокса-Кокса.

ОБГОВОРЕННЯ

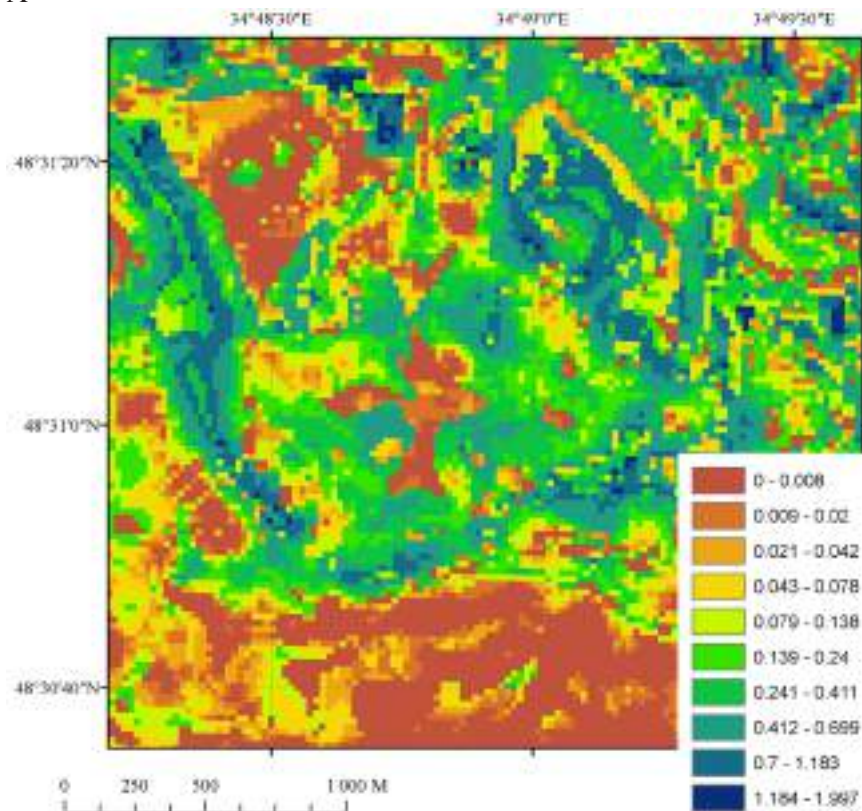
Електрична провідність ґрунту – інтегральна властивість ґрунту, яка віддзеркалює комплекс інших властивостей. Варіація вологості ґрунту, мінералізації ґрунтового розчину, ємності поглинання, гранулометричного та агрегатного складу та багатьох інших ґрунтових властивостей призводять до мінливості електропровідності. Це обумовлює те, що електропровідність виступає у якості індикатора константності ґрунтових властивостей: якщо змінюється у просторі (або у часі) яка-небудь з багатьох вказаних властивостей, то це буде супроводжуватися мінливістю електропровідності ґрунту. Вірне зворотне: константність електропровідності з великим рівнем ймовірності свідчить про константність інших властивостей ґрунту.

Електропровідність також безпосередньо пов'язана з екологічною характеристикою ґрунту як середовища існування живих організмів. Це обумовлене інтегральним зв'язком з іншими властивостями, які власне і створюють такі умови. Насамперед слід відзначити зв'язок з вологістю та мінералізацією ґрунтового розчину. Ці фактори пов'язані з такими біогеоценотичними концептами, як гігротоп та трюфотоп, які за О. Л. Бельгардом (1950) визначають типологічні особливості біогеоценозів у степовій зоні України.

Також технічною особливістю, яка набуває принципового значення, є швидкість вимірювання цього показнику, що надає можливості за відносно короткий термін зібрати значний об'єм інфор-



А



Б

Рис. 12. Просторове варіювання електричної провідності (в дСм/м), побудоване на основі коваріат, одержаних за допомогою даних дистанційного зондування Землі. А – ґрунт у стані польової вологості; Б – ґрунт у стані повної вологоємності.

мації без проведення витратних лабораторних досліджень. Принципове значення виникає внаслідок того, що ця особливість дозволяє застосовувати електричну провідність ґрунту для проведення просторових досліджень. Вивчення просторових патернів мінливості екологічних та ґрунтово-екологічних властивостей потребує значного об'єму даних у межах певної території. Витратність у широкому сенсі – часу, ресурсів, логістичні потреби – суттєво обмежують використання класичних ґрунтознавчих показників у дослідженнях в галузі просторової або ландшафтної екології.

Електрична провідність ґрунту може розглядатися як індикативна експрес-оцінка варіювання ґрунтових властивостей, яку можна використовувати для оптимізації стратегії збору інших ґрунтознавчих або екологічних показників, які більш витратні за процедурою свого визначення. Також електропровідність може виступати у якості кількісного інструментального показника таких біогеоценотичних властивостей, які визначаються за фітоіндикаційним оцінюванням (Бельгард, 1950, Didukh, 2011) – трофність та режим вологості едафотопу.

Для визначення електричної провідності ґрунту в польових умовах застосовано два підходи – це вимірювання в ґрунті з польовою вологістю та вимірювання при штучному зволоженні до стану повної вологості. Останній прийом забезпечує порівнянність одержаних даних, тому що нівелює варіабельність вологості як найважливішої ґрунтової властивості.

Рівні електропровідності ґрунту в межах дослідженого полігону навіть не наближаються до граничних, які позначають токсичний вплив розчинних солей (2 дСм/м за Смагин и др., 2006). Максимальне встановлене значення електропровідності дорівнює 1.2 дСм/м. Піщані ґрунти на арені мають електричну провідність нижчу, ніж поріг чутливості прибору.

Ґрунтуючись на підході В. П. Самсонової (2007), рівень варіювання ґрунтових властивостей можна віднести до категорії слабкої варіабельності ($CV = 7-15$, діапазон варіювання 5–28 %), помірної варіабельності ($CV = 18-32$, діапазон варіювання 8–40 %) і сильної варіабельності ($CV = 39-75$, діапазон варіювання 20–150 %). Близька класифікація рівнів варіабельності запропонована А. Варріком і Д. Ніельсеном (Warrick, Nielsen, 1980), відповідно до якої виділяються низький рівень варіабельності ($CV < 12$ %), середній ($12 < CV < 60$ %) і високий ($CV > 60$ %).

За одержаними коефіцієнтами варіації електричну провідність ґрунту в межах дослідженого полігону можна визначити як сильно варіабельний за Самсоною або високо варіабельний за Варріком та Ніельсеном. У межах окремого біогеоценозу електропровідність характеризується помірним рівнем варіації в дубняку зі свіжим різнотрав'ям ($CV = 24.8$ %) (Жуков и др., 2015), або сильним рівнем варіації в дубняку в балці Орлова ($CV = 48.6$ %), на лузі ($CV = 105.8$ %) та болоті ($CV = 128.9$ %) (неопубліковані дані). Таким чином, варіабельність електричної провідності ґрунту характеризується у цілому сильним рівнем варіації як у межах окремого біогеоценозу, так і на ландшафтному рівні. У цьому проявляє себе самоподібність досліджуваного показника на різних ієрархічних рівнях.

Електропровідність ґрунту в стані природної вологості може бути описана нормальним законом розподілу. Цей закон описує випадкові процеси, які є результатом впливу багатьох факторів, серед яких важко встановити найважливіший. Очевидно, що випадкове співвідношення факторів вологості ґрунту та мінералізації ґрунтового розчину призводять до такого закону рас поділу електропровідності.

Для електропровідності у стані повної насиченості вологою ключовим фактором варіювання стає мінералізація ґрунтового розчину, а найбільш адекватним законом розподілу стають гамма-розподіл або розподіл Вейбулла. Закон Вейбулла є двохпараметричним універсальним розподілом, який при відповідних параметрах перетворюється у нормальний, експоненціальний або інші типи розподілів. Якщо параметр форми дорівнює 3.3, то розподіл Вейбулла близький до нормального закону. Параметр форми розподілу Вейбулла для електропровідності у стані польової вологості становить 2.03, що вказує на його наближеність до нормального закону порівняно зі станом повної вологості, для якого параметр форми становить 1.2.

Просторове варіювання електричної провідності ґрунту на ландшафтному рівні може бути обумовлене фактором рельєфу та фактором організації рослинного покриву. Рельєф є важливим фактором ґрунтоутворення, який перерозподіляє вологу та таким чином впливає на переміщення розчинних солей. Крім того, рельєф відображає процеси переміщення геомас, що пов'язане з просторовою

мінливістю гранулометричного складу ґрунтів. Ці властивості ґрунту визначають варіювання його електропровідності. Рельєф кількісно охарактеризований за допомогою цифрової моделі рельєфу та сукупності похідних геоморфологічних показників. Якісний аспект геоморфологічної організації рельєфу дослідженого полігону охарактеризований за допомогою встановлення елементарних типів рельєфу за Івахаші та Пайком (Iwahashi, Pike, 2007). Такий підхід дозволяє у межах відносно рівнинного рельєфу виділити достатню кількість елементів рельєфів для описання його різноманіття за допомогою індексу Шеннона.

Між електропровідністю ґрунту та рослинним покривом існує взаємний зв'язок. З одного боку, електропровідність ґрунту маркує найважливіші аспекти екологічного простору рослин – вологість та мінералізація ґрунтового розчину. З іншого боку, пертинентний вплив рослин обумовлює варіабельність електропровідності. Цим пояснюється вибір вегетаційних та інших індексів Landsat як інформаційних маркерів для побудови моделі варіювання електропровідності у межах дослідженого полігону. Також була проведена процедура класифікація типів рослинності за їх спектральними властивостями та встановлені показники різноманіття рослинного покриву.

Перспективні змінні-предиктори були піддані змішаному аналізу відповідностей, який дозволив зменшити простір ознак до 19 канонічних змінних (власні числа яких були більше 1) або до 5 (за критерієм Кеттела). Останнє рішення обране як головне, так як ще важливим критерієм для визначення кількості канонічних змін є можливість їх інтерпретувати. Поряд з наведеною якісною інтерпретацією канонічних змінних слід особливо підкреслити ту особливість, що всі вони характеризуються значною роллю показників рельєфного різноманіття та різноманіття рослинного покриву. Статистично вірогідний характер канонічних осей як предикторів електропровідності вказує також на значення ландшафтно-екологічного різноманіття як фактору варіювання ґрунтових властивостей.

При обчисленнях показників ландшафтно-екологічного різноманіття (рослинного або рельєфного його аспектів) ураховується просторовий контекст – кількість якісних типів покриву, що знаходяться навколо даної точки простору. Саме ця кількість виражена як різноманіття також виступає як чинник, який впливає на варіювання ґрунтових властивостей.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження нами встановлена процедура, яка дозволяє трансформувати точкові об'єкти, які містять інформацію про електричну провідність ґрунту в континуальний (растровий) шар на основі визначеної регресійної залежності досліджуваного показника від предикторів, які встановлені на основі даних дистанційного зондування поверхні Землі. Предикторами виступають канонічні осі, які одержані внаслідок змішаного аналізу відповідностей, якому піддали континуальні дані (цифрова модель рельєфу та її похідні, вегетаційні та інші індекси Landsat, значення рельєфного різноманіття та різноманіття рослинного покриву) та дискретні дані (результати класифікації поверхні Землі на елементарні рельєфні одиниці та типи рослинного покриву). Важливим результатом є залежність електричної провідності ґрунту від показників рельєфного різноманіття та різноманіття рослинного покриву.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

- Балюк Ю.А. Адаптивная стратегия отбора проб для оценки пространственной организации сообществ почвенных животных урбанизированных территорий на различных иерархических уровнях / Ю. А. Балюк, О. Н. Кунах, А. В. Жуков, Г. А. Задорожная, Д. С. Ганжа // Биологический вестник Мелитопольского государственного педагогического университета имени Богдана Хмельницкого. – 2014. – № 4 (3). – С. 8–33.
- Бельгард А. Л. Лесная растительность юго-востока УССР / А. Л. Бельгард // Киев.: Изд-во КГУ, 1950. – 263 с.
- Демидов А. А. Пространственная агроэкология и рекультивация земель: монография / Демидов А.А., Кобец А.С., Грицан Ю.И., Жуков А.В. – Днепропетровск: Изд-во «Свидлер А.Л.», 2013. – 560 с.
- Жуков А. В. Экоморфическая организация сообществ мезопедобионтов дубняка со свежим разнотравьем на арене р. Днепр / А. В. Жуков, О. Н. Кунах, В. А. Новикова // Известия Харьковского энтомологического общества – 2015. – Т. XXIII, вып. 2. – С. 39–53.
- Жуков А. В. Ландшафтная экология как основа пространственного анализа продуктивности агроценозов / А. В. Жуков, О. Н. Кунах, Г. А. Задорожная, Е. В. Андрусевич // Экологія та ноосферологія, 2013. – Т. 24, № 1–2. – С. 68–80.

- Жуков А. В. Иерархическая организация экологического разнообразия растительности техноземов / А. В. Жуков, О. Н. Кунах, Г. А. Задорожная, Е. В. Андрусевич // Біологічний вісник МДПУ ім. Б. Хмельницького – 2013. – Т. 9, № 4. – С. 37–47.
- Жуков А. В. Ландшафтный аспект экологической ниши слепышей / А. В. Жуков, О. Н. Кунах, Т. М. Коновалова // Біологічний вісник МДПУ ім. Б. Хмельницького – 2011. – № 3. – С. 13–27.
- Жуков А. В. Пространственная изменчивость электропроводности почвы под воздействием роющей активности слепышей на различных масштабных уровнях / А. В. Жуков, Т. М. Коновалова // Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Медицина. – 2011. – Вип. 2, т. 2. – С. 34–41.
- Жуков А. В. Фодересфера слепышей (*Spalax microphthalmus*) / А. В. Жуков, О. Н. Кунах, Т. П. Коновалова // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – Донецк: ДонНУ, 2010. – Вып. 10, № 1. – С. 105–123.
- Жуков А. В. Иерархическая организация и разнообразие животного населения почвы поймы // Пит. степ. лісознавства та лісової рекультивациі земель. – Дніпропетровськ. – 2006. – Вип. 10 (35). – С. 170–184.
- Жуков А. В., Задорожная Г. А., Андрусевич Е. В. Оптимальная стратегия отбора почвенных образцов на основании данных об электрической проводимости техноземов // Біологічний вісник МДПУ ім. Б. Хмельницького. – 2012. – № 4. – С. 64–80.
- Жуков А.В. Экологическое значение пространственной изменчивости твёрдости почвы в условиях природного земледелия / А.В. Жуков, Г.А. Задорожная, А.А. Демидов, Е.В. Рысина // Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва. – Умань, 2014. – вип. 84. – С. 21–37.
- Коломбар Т. Роль педотурбаційної активності сліпака звичайного (*Spalax microphthalmus*) у формуванні структури ґрунтового покриву / Т. Коломбар, О. Пахомов, О. Жуков // Вісник Львівського університету. Серія біологічна. – 2014. – Вип. 64. – С. 219–225.
- Кунах О. М. Геоморфологічні екогеографічні змінні, які визначають особливості екологічної ніші ваточника сирійського (*Asclepias syriaca* L.) / О. М. Кунах, О. С. Папка // Біологічний вісник МДПУ. – 2016. – №1. – С. 243–275.
- Кунах О.М. Екогеографічні детермінанти екологічної ніші ваточника сирійського (*Asclepias syriaca*) на основі індексів знімків дистанційного зондування Землі / О.М. Кунах, О.С. Папка // Вісник Дніпропетровського університету. Біологія, екологія. – 2016. – 24(1). – С. 78–86.
- Лисецкий Ф. Н. Эрозионные катены на земляных фортификационных сооружениях / Ф. Н. Лисецкий, В. В. Половинко // Геоморфология. – 2012. – № 2. – С. 65–78.
- Митчел Дж.К. Расчеты потерь почвы / Дж.К. Митчел, Г.Д. Бубензер. – Эрозия почв. М.: Колос, 1984. – С. 34–95.
- Пахомов А. Е. ГИС-подход для оценки изменчивости электропроводности почвы под влиянием педотурбационной активности слепыша (*Spalax microphthalmus*) / А. Е. Пахомов, Т. М. Коновалова, А. В. Жуков // Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Екологія. – 2010. – Вип. 18, т. 1. – С. 58–66.
- Пузаченко Ю.Г. Методологические основания отображения элементарных геосистемных процессов / Ю.Г. Пузаченко, М.В. Федяева, Д.Н. Козлов, М.Ю. Пузаченко // Современные естественные и антропогенные процессы в почвах геосистем. М.: Почв. ин-т им. В. В. Докучаева, 2006. – С. 13–52.
- Самсонова В. П. Пространственная изменчивость почвенных свойств: на примере дерново-подзолистых почв / В. П. Самсонова. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 160 с.
- Смагин А. В. Теория и практика конструирования почв / А. В. Смагин / Москва: Издательство Московского университета, 2012. – 542 с.
- Смагин А.В. Некоторые критерии и методы оценки экологического состояния почв в связи с озеленением городских территорий / А.В. Смагин, Н.А. Азовцева, М.В. Смагина, А.Л. Степанов, А.Д. Мягкова, А.С. Курбатова // Почвоведение. – 2006. – № 5. – С. 603–615.
- Шейн Е. В. Пространственная неоднородность свойств на различных иерархических уровнях – основа структуры и функций почв / Е. В. Шейн, Е. Ю. Милановский // Масштабные эффекты при исследовании почв. – М.: МГУ, 2001. – С. 47–61.
- Asar O. Estimating Box-Cox Power Transformation Parameter via Goodness of Fit Tests / O. Asar, O. Ilk, O. Dag // Communications in Statistics - Simulation and Computation. – 2014. – Vol. 43 (7). – P. 1740–1759
- Beven K., Kirkby N. A physically based variable contributing area model of basin hydrology // Hydro. Sci. Bull. – 1979. – P. 43–69.
- Bock M. Predicting the Depth of hydrologic Soil Characteristics / M. Bock, R. Köthe // Hamburger Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsökologie – 2008. Heft 19. – S. 13–22.
- Boehner J. Land Surface Parameters Specific to Topo-Climatology / J. Boehner, O. Antonic // Hengl, T. & Reuter, H.I. [Eds.]: Geomorphometry – Concepts, Software, Applications. – 2009. – P. 195–226.

- Box G. E. P. An Analysis of Transformations (with discussion) / G. E. P. Box, D. R. Cox // *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*. – 1964. – Vol. 26. – P. 211–252.
- Cattell D. R. B. The scree test for the number of factors / D. R. B. Cattell // *Multivariate Behav. Res.* – 1966. – Vol. 1. – P. 245–276.
- Corwin D. L., Lesch S. M. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture – theory, principles, and guidelines // *Agron. J.* – 2003. – Vol. 95(3). – P. 455–471.
- Corwin D.L. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture / D.L. Corwin, S.M. Lesch, // *Comp. Electron. Agric.* – 2005. – Vol. 46. – P. 11–43.
- Delignette-Muller M.L. Fitdistrplus: An R Package for Fitting Dis-tributions / M.L. Delignette-Muller, C. Dutang // *Journal of Statistical Software*. – 2015. – Vol. 64(4). – P. 1–34.
- Didukh Ya.P. The ecological scales for the species of Ukrainian flora and their use in synphytoindication / Ya.P. Didukh. – Kyiv: Phytosociocentre, 2011. – 176 p.
- Dray S. The ade4 package: implementing the duality diagram for ecologists / S. Dray, A.B. Dufour // *Journal of Statistical Software*. – 2007. – Vol. 22(4). – P. 1–20.
- Forgy E. Cluster Analysis of multivariate data: efficiency vs. interpretability of classifications / E. Forgy // *Biometrics*. – 1965. – Vol. 21. – P. 768–769.
- Francis D. D. Selective soil sampling for site- Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and specific nutrient management / D. D. Francis, J. S. Schepers // *Soil Sci. Soc. Am. J.* – 1997. – Vol. 53. – P. 119–126.
- Gallant J.C. A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas / Gallant, J.C., T.I. Dowling // *Water Resources Research*. – 2003. – Vol. 39/12. – P. 1347–1359.
- Grohmann C. H. Resampling SRTM 03"- data with kriging // *GRASS/OSGeo-News*. – 2006. – Vol. 4. – P. 20–25.
- Guisan A. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution / A. Guisan, S. B. Weiss, A. D. Weiss // *Plant Ecology*. – 1999. – Vol. 143. – P. 107–122.
- Hill M. O. Principal component analysis of taxonomic data with multistate discrete characters / M. O. Hill, A. J. E. Smith // *Taxon*. – 1976. – Vol. 25. – P. 249–255.
- Iwahashi J. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature / J. Iwahashi, R.J. Pike // *Geomorphology*. – 2007. – Vol. 86. – P. 409–440
- McCool D.K. The Revised Universal Soil Loss Equation / D.K. McCool., K.G. Renard, G.R. Foster // *Proceedings of an International Workshop on Soil Erosion*. The Center for Technology Transfer and Pollution Prevention, Purdue University. West Lafayette, IN., USA. – 1994. – P. 45–59.
- McGarigal K., S. A. Cushman, M.C. Neel, E. Ene FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. – 2002. – Available at the following web site: <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>
- Moeller M. Placing soil-genesis and transport processes into a landscape context: A multiscale terrain-analysis approach / M. Moeller, M. Volk, K. Friedrich, L. Lymburner // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. – 2008. – Vol. 171. – P. 419–430.
- Moore I. Soil attribute prediction using terrain analysis / I. Moore, P. Gessler, G. Nielsen, G. Peterson // *Soil Sci. Soc. Am. J.* – 1993. – Vol. 57. – P. 443–452.
- Moreno J.F. Analysis, Investigation and Monitoring of Water resources, for the management of multi-purpose reservoirs // *Survey of Remote Sensing Data Analysis Methods*. Contract № ENV4-CT98-0740 Version 1.0, WP 3100 – EO Signal Analysis Methods. – 1999. http://dataserv.cetp.ipsl.fr/AIMWATER/reports/EOsurvey_report.pdf
- Orlanski J. A rational subdivision of scales for atmospheric processes / J. Orlanski // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* – 1975. – Vol. 56. – P. 527–530.
- Pennisi B.V. 3 ways to measure medium EC / B.V. Pennisi, M. van Iersel // *GMPPro*. – 2002. – Vol. 22(1). – P. 46–48.
- R Core Team. 2015. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>
- Sappington J. M. Quantifying landscape ruggedness for animal habitat analysis: a case study using desert bighorn sheep in the Mojave Desert / J. M. Sappington, K. M. Longshore, D. B. Thompson // *Journal of Wildlife Management*. – 2007. – Vol. 71(5). – P. 1419–1426.
- Scoggins H. L. In situ probes for measurement of EC of soilless substrates: effects of temperature and substrate moisture content / H. L. Scoggins, M. W. van Iersel // *HortScience*. – 2006. – Vol. 41. – P. 210–214.
- Valeriano M. M. Modeling small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radar topographic mission-90m data / M. M. Valeriano, T. M. Kuplich, M. Storino, B. D. Amaral, J. N. Mendes, D. J. Lima // *Computers and Geosciences*. – 2006. – Vol. 32. – P. 1169–1181.
- van Deventer A. P. Using Thematic Mapper data to identify contrasting soil plains and tillage practices / A. P. van Deventer, A. D. Ward, P. H. Gowda, J. G. Lyon // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. – 1997. – Vol. 63. – P. 87–93.

- Warrick A. W. Spatial variability of soil physical properties in the field / A. W. Warrick, D. R. Nielsen // Hilel D. (Ed.). Application of soil physics. New York: Academic Press. – 1980. – P. 319–344.
- Wischmeier W. H. Predicting rainfall erosion losses / W. H. Wischmeier, D. D. Smith. – Agricultural handbook. Washington. – 1978, № 537. – 65 p.

REFERENCES

- Asar, O., Ilk, O., Dag, O. (2014). Estimating Box-Cox Power Transformation Parameter via Goodness of Fit Tests. *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 43(7), 1740–1759.
- Baljuk, J.A., Kunah, O.N., Zhukov, A. V., Zadorozhnaja, G.A., Ganzha, D.S. (2014). Sampling adaptive strategy and spatial organisation estimation of soil animal communities at various hierarchical levels of urbanised territories. *Biological Bulletin of Bogdan Chmelnytskyi Melitopol State Pedagogical University*, 4(3), 8–33 (in Russian).
- Belgard, A.L. (1950). *Forest vegetation of the south-eastern Ukraine*. Kiev: Kiev State University. (in Russian)
- Beven, K., Kirkby, N. (1979). A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydro. Sci. Bull.*, 43–69.
- Bock, M., Köthe, R. (2008). Predicting the Depth of hydrologic Soil Characteristics. *Hamburger Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsökologie*, 19, 13–22.
- Boehner, J., Antonic, O. (2009). Land Surface Parameters Specific to Topo-Climatology. In: Hengl, T., Reuter, H. (Eds.) *Geomorphometry – Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science*, 33, 195–226.
- Box, G. E. P., Cox, D. R. (1964). An Analysis of Transformations (with discussion). *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*, 26, 211–252.
- Cattell, D. R. B. (1966). The scree test for the number of factors. *Multivariate Behav. Res.*, 1, 245–276.
- Corwin, D. L., Lesch, S. M. (2003). Application of soil electrical conductivity to precision agriculture – theory, principles, and guidelines. *Agron. J.* 95(3), 455–471.
- Corwin, D.L. (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Comp. Electron. Agric.*, 46, 11–43.
- Delignette-Muller, M.L., Dutang, C. (2015). Fitdistrplus: An R Package for Fitting Distributions. *Journal of Statistical Software*, 64(4), 1–34.
- Demidov, A.A., Kobets, A.S., Gritsan, Yu.I., Zhukov, A.V. (2013). *Spatial agricultural ecology and soil recultivation*. Dnepropetrovsk: A.L. Svidler Press. (in Russian)
- Didukh, Ya.P. (2011). *The ecological scales for the species of Ukrainian flora and their use in synphytoindication*. Kyiv: Phytosociocentre (in Russian).
- Dray, S., Dufour, A.B. (2007). The ade4 package: implementing the duality diagram for ecologists. *Journal of Statistical Software*, 22(4), 1–20.
- Forgy, E. (1965). Cluster Analysis of multivariate data: efficiency vs. interpretability of classifications. *Biometrics*, 21, 768–769.
- Francis, D. D., Schepers, J. S. (1997). Selective soil sampling for site- Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and specific nutrient management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53, 119–126.
- Gallant, J.C., Dowling, T.I. (2003). A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water Resources Research*, 39(12), 1347–1359.
- Grohmann, C. H. (2006). Resampling SRTM 03”– data with kriging. *GRASS/OSGeo-News*, 4, 20–25.
- Guisan, A., Weiss, S. B. (1999). GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology*, 143, 107–122.
- Hill, M. O., Smith, A. J. E. (1976). Principal component analysis of taxonomic data with multistate discrete characters. *Taxon*, 25, 249–255.
- Iwahashi, J., Pike, R.J. (2007). Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. *Geomorphology*, 86, 409–440.
- Kolombar, T., Pakhomov, O., Zhukov, A. (2014). The role of pedoturbation activity of greater mole rat (*Spalax microphthalmus*) in determining the structure of the soil cover. *Visnyk of the Lviv University. Series Biology*, 64, 219–225 (in Ukrainian).
- Konovalova, T. M., Zhukov, A. V., Pakhomov, A. Y. (2010). GIS-approach for variability assessment of soil electric conductivity under pedoturbation activity of mole rat (*Spalax microphthalmus*). *Visnyk of Dnipropetrovsk University. Biology, ecology*, 18(1), 58–66 (in Russian).
- Kunah, O. M., Papka, O. S. (2016). Ecogeographical determinants of the common milkweed (*Asclepias syriaca* L.) ecological niche on the basis of indexes of land remote sensing images. *Visnyk of Dnipropetrovsk University. Biology, ecology*, 24(1), 78–86 (in Ukrainian).

- Kunah, O. M., Papka, O. S. (2016). Geomorphological ecogeographical variables defining features of an ecological niche of common milkweed (*Asclepias syriaca* L.). *Biological Bulletin of Bogdan Chmelnytsky Melitopol State Pedagogical University*, 1, 243–275 (in Ukrainian).
- Lisetzky, F. N., Polovinko, V. V. (2012). Erosion catens on the land fortification construction. *Geomorphology*, 2, 65–78.
- McCool, D.K., Renard, K.G., Foster, G.R. (1994). The Revised Universal Soil Loss Equation. *Proceedings of an International Workshop on Soil Erosion*. The Center for Technology Transfer and Pollution Prevention, Purdue University. West Lafayette, IN., USA.
- McGarigal, K., Cushman, S. A., Neel, M.C., Ene, E. (2002). FRAGSTATS: *Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps*. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. Retrieved from: <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>
- Mitchel, J., Bubenser, G. D. (1984). *Soil loss calculation*. Soil erosion. Moscow: Kolos (in Russian).
- Moeller, M., Volk, M., Friedrich, K., Lymburner, L. (2008). Placing soil-genesis and transport processes into a landscape context: A multiscale terrain-analysis approach. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171, 419–430.
- Moore I., Gessler, P., Nielsen, G., Peterson, G. (1993). Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, 443–452.
- Moreno, J.F. (1999). *Analysis, Investigation and Monitoring of Water resources, for the management of multi-purpose reservoirs*. Survey of Remote Sensing Data Analysis Methods. Contract № ENV4-CT98-0740 Version 1.0, WP 3100 - EO Signal Analysis Methods. Retrieved from: http://dataserv.cetp.ipsl.fr/AIMWATER/reports/EOsurvey_report.pdf
- Orlanski, J. (1975). A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 56, 527–530.
- Pennisi, B.V., M. van Iersel (2002). 3 ways to measure medium EC. *GMPPro*, 22(1), 46–48.
- Puzachenko, J.G., Fedjaeva, M.V., Kozlov, D.N., Puzachenko M.J. (2006). *Methodological basis to display of elementary geosystem processes*. Modern natural and anthropogenous processes in geosystems soils. Moscow: Soils V.V. Dokuchayev institute (in Russian).
- R Core Team. (2015). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>
- Samsonova, V. P. (2008). *Soil properties spatial variability: sod-podzol soils as an example*. Moscow: LKI (in Russian)
- Sappington, J. M., Longshore, K. M., Thompson, D. B. (2007). Quantifying landscape ruggedness for animal habitat analysis: a case study using desert bighorn sheep in the Mojave Desert. *Journal of Wildlife Management*, 71(5), 1419–1426.
- Scoggins, H. L., van Iersel, M. W. (2006). In situ probes for measurement of EC of soilless substrates: effects of temperature and substrate moisture content. *HortScience*, 41, 210–214.
- Shein, E. V., Milanovsky, E. Yu. (2001). *Spatial heterogeneity of properties on different hierarchic levels as a basis of soils structure and functions*. Scale effects in the study of soils. Moscow: Publishing House of Moscow State University (in Russian).
- Smagin, A. V. (2012). *The theory and practice of constructing soil*. Moscow: MSU university press (in Russian).
- Smagin, A. V., Azovtseva, N. A., Smagina, M. V., Stepanov, A. L., Myagkova, A. D., Kurbatova, A. S. (2006). Criteria and methods to assess the ecological status of soils in relation to the landscaping of urban territories. *Eurasian soil science*, 5, 603–615 (in Russian).
- Valeriano, M. M., Kuplich, T. M., Storino, M., Amaral, B. D., Mendes, J. N., Lima, D. J. (2006). Modeling small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radar topographic mission-90m data. *Computers and Geosciences*, 32, 1169–1181.
- van Deventer, A. P., Ward, A. D., Gowda, P. H., Lyon, J. G. (1997). Using Thematic Mapper data to identify contrasting soil plains and tillage practices. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63, 87–93.
- Warrick, A. W., Nielsen, D. R. (1980). *Spatial variability of soil physical properties in the field*. Application of soil physics. New York: Academic Press.
- Wischmeier, W. H., Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses*. Agricultural handbook. Washington.
- Zhukov, A. V., Kunah, O. N., Zadorozhnaya, G. A., Andrusevich, E. V. (2013). Hierarchy of ecological diversity of industrial soil plants. *Biological Bulletin of Bogdan Chmelnytsky Melitopol State Pedagogical University*, 9(4), 37–47 (in Russian).
- Zhukov, A. V., Kunah, O. N., Zadorozhnaja, G. A., Andrusevich, E. V. (2013). Landscape ecology as a basis of the spatial analysis of agrocoenosis productivity. *Ecology and Noospherology*, 24(1–2), 68–80 (in Russian).

-
- Zhukov, A. V., Kunakh, O. N., Novikova, V. A. (2015). The ecomorphic organization of mesopedobionts community of oak forest with the fresh grass on arena of the Dnieper river. *The Kharkov Entomol. Soc. Gaz.*, 23(2), 39–53 (in Russian).
- Zhukov, A. V., Zadorozhnaya, G. O., Demidov, A. A., Rysina, E. V. (2012). Ecological importance of spatial variability of soil penetration resistance in the conditions of natural farming. *Journal of Uman National University of Horticulture*, 84, 21–37 (in Russian).
- Zhukov, O. V., Zadorozhnaya, G. A., Andrusevich, Ye. V. (2012). The optimal strategy of the soil sampling on the basis of the technosems electrical conductivity data. *Biological Bulletin of Bogdan Chmelnytsky Melitopol State Pedagogical University*, 2(1), 64–80 (in Russian).
- Zhukov, A. V. (2006). Hierarchy organization and diversity of the animal communities of the flooded territories. *Issues of steppe forestry and forest reclamation of soils*, 10(35), 170–184 (in Russian).
- Zhukov, A. V., Konovalova, T. M. (2011). Spatial variability of soil electrical conductivity under the mole rats (*Spalax microphthalmus*) digging activity at the different scales. *Visnyk of Dnipropetrovsk University. Biology, medicine*, 2(2), 34–41 (in Russian).
- Zhukov, A. V., Kunakh, O. N., Konovalova, T. M. (2010). Foderesphere of mole rats (*Spalax microphthalmus*). *Problems of ecology and nature conservation of technological region*, 10(1), 105–123 (in Russian).
- Zhukov, A. V., Kunakh, O. N., Konovalova, T. M. (2011). Landscape aspect of the mole rats (*Spalax microphthalmus* Guldenstaedt 1770) ecological niche. *Biological Bulletin of Bogdan Chmelnytsky Melitopol State Pedagogical University*, 1(3), 13–27 (in Russian).