

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКА ЕКОЛОГІЯ.
РОСЛИННИЦТВО. ЗЕМЛЕРОБСТВО. СЕЛЕКЦІЯ

УДК 632.51:93
© 2016

О.С. ПАПКА,
аспірант

Полтавська державна
аграрна академія, Україна
E-mail: zhikov-dnepr@yandex.ua
м. Полтава, вул. Сковороди, 1/3

ГЕОМОРФОЛОГІЧНІ
ДЕТЕРМІНАНТИ
ВЕГЕТАЦІЙНОГО
ІНДЕКСУ NDVI
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ
УГІДЬ ПОЛТАВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Встановлено варіабельність фітомаси рослинного покриву сільськогосподарських угідь експериментального полігону з використанням індексу NDVI. Визначено характер впливу на нього рельєфу, вираженого за допомогою геоморфологічних показників. Показано, що геоморфологічні предиктори навесні здатні пояснити 13 %, наприкінці літа – 11 % варіабельності індексу NDVI. Крім того, на показник NDVI впливає така геоморфологічна ознака, як топографічний індекс поверхневого змиву ґрунту (LS-фактор). Геоморфологічні предиктори в межах загальної лінійної моделі здатні обґрунтувати 21 % варіабельності діапазона мінливості NDVI наприкінці літа.

Ключові слова: вегетаційні індекси, Landsat, NDVI, просторова варіабельність, цифрова модель рельєфу.

Методи аналізу даних дистанційного зондування землі дозволяють оцінити властивості та процеси в екосистемах та їх річну динаміку на різних масштабних рівнях, оскільки спостереження із супутника проводяться зі значним просторовим охопленням, значним просторовим дозволом і часовою періодичністю [8]. Оцінка наземної біомаси необхідна для вивчення продуктивності, кругообігу вуглецю, розподілу поживних речовин у наземних екосистемах [1, 9]. У ряді досліджень показано, що такі спектральні вегетаційні індекси, отримані за допомогою даних із супутника, є добрими предикторами індексу листкової поверхні (LAI), біомаси та продуктивності лісових та лугових екосистем, а також сільськогосподарських угідь [2–7].

Важливою науковою проблемою є визначення факторів, які впливають на фітомасу наземних екосистем, у тому числі агроекосистем. Ми висловлюємо гіпотезу, що рельєф, який перерозподіляє дію кліматичних факторів, визначає просторову варіабельність фітомаси. Тому для перевірки цієї гіпотези метою нашої роботи було встано-

вити варіабельність фітомаси рослинного покриву сільськогосподарських угідь експериментального полігону в межах Полтавської області за допомогою індексу NDVI та визначити характер впливу на нього рельєфу, вираженого за допомогою геоморфологічних показників.

Матеріали та методи дослідження. Розвиток багатоканальної космічної зйомки та технологій побудови тривимірних моделей рельєфу створює нові можливості для дослідження зв'язків видів з умовами середовища та оцінки якості місцеперебувань [1, 3]. 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>).* Зйомки земної поверхні проведені 23 березня та 27 серпня 2015 р.

Поряд із прямими призначенням каналів *Landsat* властивості середовища селективно відбиваються через їх співвідношення

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКА ЕКОЛОГІЯ. РОСЛИННИЦТВО. ЗЕМЛЕРОБСТВО. СЕЛЕКЦІЯ

Геоморфологічні детермінанти вегетаційного
індексу NDVI сільськогосподарських угідь
Полтавської області

(індекси) [1]. Нормалізований різницевий індекс рослинності (*Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI) встановлений за формулою

$$(B5 - B4) / (B5 + B4),$$

де B4 та B5 – значення у каналах 4 та 5 зображень зі супутника Landsat 8 відповідно.

Як геоморфологічні предиктори було обрано перелік показників [2, 3]: DEM (висота рельєфу над рівнем моря), TWI (топографічний індекс вологості), ФАР (фотосинтетично активна радіація), LS (фактор ерозії), ТРІ (індекс топографічного положення). Дані про площі сільськогосподарських полів для статистичного аналізу були попередньо прологарифмовані (*Log Area*).

Для створення цифрової моделі рельєфу інформацію одержано з ресурсу EarthExplorer (<http://earthexplorer.usgs.gov>). За осно-

ву взято інформаційний продукт SRTM 1 Arc-Second Global. Продукт SRTM (топографічна радарна місія шаттлов – *Shuttle Radar Topography Mission*) надає інформацію про висоту поверхні Землі зі заповненими пустотами з розрізняючою здатністю 1 арксекунда (близько 30 м). Просторові дані оброблено за допомогою програми ArcGis 10.0. Похідні від цифрової моделі рельєфу одержано за допомогою програми SAGA 2.2.2 (www.saga-gis.org). Статистичні розрахунки проведено в програмі Statistica 7.0.

Результати дослідження та їх обговорення. Нормалізований різницевий вегетаційний індекс (NDVI) добре відображає вегетаційну масу рослинного покриву, в тому числі агро-екосистем [2]. Просторове відображення індексу NDVI навесні (а) та влітку (б) у межах досліджуваного полігону наведене на рис. 1.

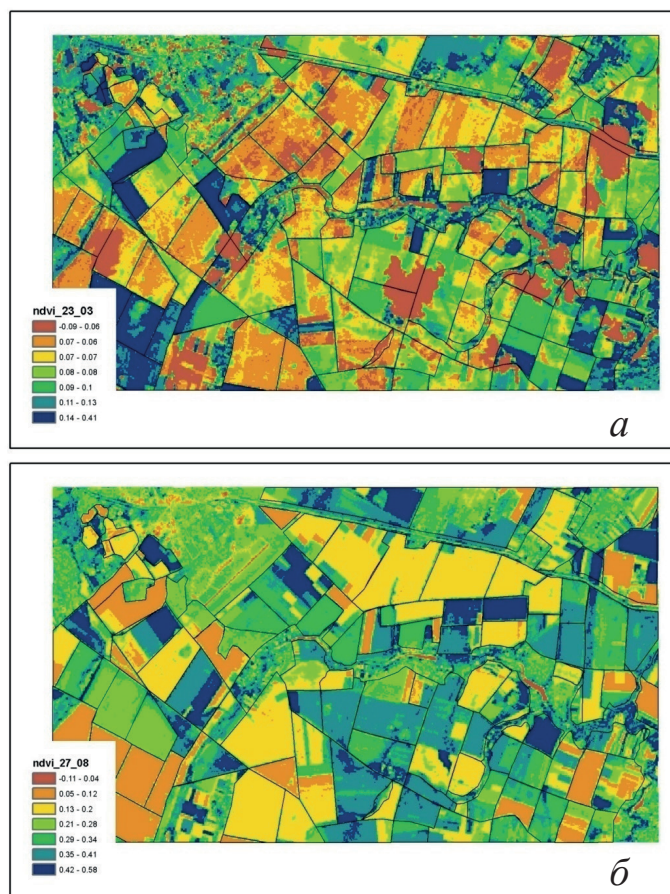


Рис. 1.
Просторове варіювання
індексу NDVI:
а – 23 березня;
б – 27 серпня 2015 року

Навесні, 23 березня 2015 р., у середньому по дослідженій території індекс NDVI становив 0,08 з діапазоном варіювання (-0,09)–0,41. У межах сільськогосподарських полів цей показник у середньому дорівнював 0,09±0,01 з діапазоном варіювання (-0,09)–(+0,41).

Аналіз розподілу значень NDVI свідчить про те, що він добре описується гамма-законом (тест Колмогорова-Смірнова: $d = 0,17$; $p < 0,01$) – рис. 2.

Навесні, у початковий період розвитку рослин, переважна більшість полів характеризується досить низькими значеннями індексу NDVI. Від'ємні значення цього індексу вказують на відкриту поверхню ґрунту без рослинного покриву. Деякі поля мають досить високі значення індексу NDVI, що відповідає полям з озимими посівами. За даними дистанційного зондування Землі легко помітити, що в деяких випадках сільськогосподарські поля засіваються різними культурами, яким притаманні різні значення індексу.

Нами встановлено, що між площею полів та показником NDVI існує статистично вірогідний від'ємний зв'язок ($r = -0,26$; $p = 0,001$). По-перше, це вказує на те, що озимі культури вирощують здебільшого на відносно малих за площею полях. По-друге, у межах великого поля вірогідність зон з меншою інтенсивністю сходів буде більшою, внаслідок чого в середньому на великих полях у раньовесняний період показники індексу NDVI дещо менші.

Діапазон варіювання індексу в межах окремого поля вказує на однорідність сходів.

Відзначимо, що саме навесні причиною змін вегетаційного індексу можуть бути сходи не тільки культурних рослин, а й бур'янів. Саме варіабельність сходів останніх може бути причиною мінливості значень індексу NDVI в межах поля. Встановлено, що в межах поля в середньому вегетаційний індекс варіює в межах 0,17±0,01.

Розподіл значень діапазону варіювання значень NDVI в межах сільськогосподарських полів підкорюється закону гамма-розподілу (тест Колмогорова-Смірнова: $d = 0,07$; $p = n.s.$). Між розміром полів та діапазоном варіювання NDVI є позитивний зв'язок ($r = 0,17$; $p = 0,05$).

Загальна лінійна модель впливу геоморфологічних предикторів на середній рівень показника NDVI для сільськогосподарських полів є статистично вірогідною та пояснює 13 % варіабельності ознаки (таблиця).

Поряд з площею поля, статистично вірогідним предиктором показника NDVI, є ФАР. Очевидно, саме на початкових етапах вегетаційного періоду кількість сонячної енергії, яка надходить до поверхні Землі в умовах Полтавської області, є вирішальною для стимулювання інтенсивності зростання рослин на полях. Не можна виключати і стимулюючого впливу на зростання бур'янів.

Загальна лінійна модель вказує також на те, що рівень варіювання індексу NDVI в межах поля є властивістю, яка визначається його розміром і не залежить від геоморфологічних ознак в явному вигляді.

Наприкінці літа, 27 серпня 2015 р., в середньому по дослідженій території, індекс

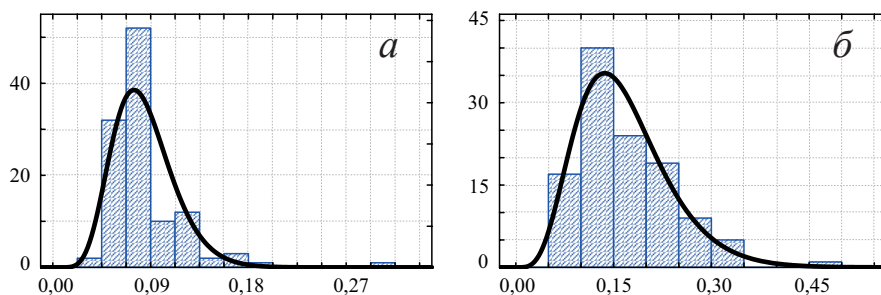


Рис. 2. Гістограми розподілу значень індексу NDVI: а – ранньою весною; б – діапазон мінливості цього показника в межах сільськогосподарського поля (чорна лінія вказує на теоретичний нормальний розподіл)

1. Загальна лінійна модель впливу розмірів поля та геоморфологічних предикторів на значення індексу NDVI в межах сільськогосподарських полів, 2015 р.

Предиктор	Ефект			F-відношення	p-рівень
	суми квадратів	ступінь волі	Середнє значення		
<i>Середнє значення NDVI ($R^2 = 0,13$; $p = 0,02$)*</i>					
<i>Середнє значення NDVI ($R^2 = 0,13$; $p = 0,02$)</i>					
Константа	<u>0,00</u> 0,00	<u>1</u> 1	<u>0,00</u> 0,00	<u>4,01</u> 0,23	<u>0,05</u> 0,63
Log_Area	<u>0,01</u> 0,03	<u>1</u> 1	<u>0,01</u> 0,03	<u>7,55</u> 3,60	<u>0,01</u> 0,05
DEM	<u>0,00</u> 0,00	<u>1</u> 1	<u>0,00</u> 0,00	<u>0,16</u> 0,46	<u>0,69</u> 0,50
TWI	<u>0,00</u> 0,00	<u>1</u> 1	<u>0,00</u> 0,00	<u>0,94</u> 0,33	<u>0,33</u> 0,57
ФАР	<u>0,01</u> 0,00	<u>1</u> 1	<u>0,01</u> 0,00	5,00 0,30	0,03 0,59
LS	<u>0,00</u> 0,06	<u>1</u> 1	<u>0,00</u> 0,06	<u>1,26</u> 7,20	<u>0,26</u> 0,01
TRI	<u>0,00</u> 0,00	<u>1</u> 1	<u>0,00</u> 0,00	<u>0,59</u> 0,02	<u>0,44</u> 0,88
Помилка	<u>0,11</u> 0,88	<u>108</u> 108	<u>0,00</u> 0,01	- -	- -
<i>Діапазон мінливості NDVI у межах поля ($R^2 = 0,06$; $p = 0,40$)*</i>					
<i>Діапазон мінливості NDVI у межах поля ($R^2 = 0,21$; $p = 0,00$)</i>					
Константа	<u>0,00</u> 0,02	<u>1</u> 1	<u>0,00</u> 0,00	<u>0,15</u> 4,05	<u>0,70</u> 0,05
Log_Area	<u>0,03</u> 0,10	<u>1</u> 1	<u>0,03</u> 0,10	<u>5,07</u> 21,00	<u>0,03</u> 0,00
DEM	<u>0,01</u> 0,04	<u>1</u> 1	<u>0,01</u> 0,04	<u>2,10</u> 8,22	<u>0,15</u> 0,00
TWI	<u>0,00</u> 0,00	<u>1</u> 1	<u>0,00</u> 0,00	<u>0,71</u> 0,19	<u>0,40</u> 0,67
ФАР	<u>0,00</u> 0,02	<u>1</u> 1	<u>0,00</u> 0,02	<u>0,21</u> 4,02	<u>0,65</u> 0,05
LS	<u>0,00</u> 0,00	<u>1</u> 1	<u>0,00</u> 0,00	<u>0,00</u> 0,01	<u>0,99</u> 0,92
TRI	<u>0,00</u> 0,00	<u>1</u> 1	<u>0,00</u> 0,00	<u>0,02</u> 0,12	<u>0,88</u> 0,74
Помилка	<u>0,57</u> 0,53	<u>108</u> 108	<u>0,01</u> 0,00	- -	- -

* Чисельник – 23 березня 2015 р.; знаменник – 27 серпня 2015 р.

NDVI становив 0,26 з діапазоном варіювання (-0,11)–(+0,58). У межах сільськогосподарських полів цей показник у середньому дорівнював $0,26 \pm 0,01$ з діапазоном варіювання 0,04–0,56. Таким чином, у межах сільськогосподарських полів спостерігається значний рівень варіабельності вегетаційного індексу. Це може бути пов'язано з тим, що деякі культури у цей час вже були зібрані, а також з можливим значним коливанням рівнів розвитку рослин у межах поля.

Аналіз розподілу значень NDVI свідчить про те, що він добре описується нормальним законом (тест Колмогорова-Смірнова: $d = 0,09$; $p = n.s.$) – рис. 3.

Підкреслимо двовершинний розподіл значень індексу NDVI наприкінці літа у культур, які вже досягли піка своєї вегетації, та ті, які ще активно вегетують при збереженні зеленого фотосинтезуючого листя.

На відміну від ситуації навесні, вважаємо, між площею полів та показником NDVI в кінці літа не існує статистично вірогідного зв'язку ($r = 0,05$; $p = 0,67$).

У межах поля в середньому вегетаційний індекс варіює в межах $0,33 \pm 0,01$. Це ще раз підтверджує неоднорідність обстановки, яка формується у межах сільськогосподарського поля.

Розподіл значень діапазона варіювання значень NDVI в межах сільськогосподарських полів підкорюється закону гамма-розподілу (тест Колмогорова-Смірнова: $d = 0,07$; $p = n.s.$). Між розміром полів та діапазоном варіювання NDVI є позитивний зв'язок

($r = 0,38$; $p = 0,001$). Якщо його порівняти з кореляцією навесні, то можна стверджувати, що неоднорідність рослинного покриву збільшується протягом вегетаційного періоду.

Загальна лінійна модель впливу геоморфологічних предикторів на середній рівень показника NDVI для сільськогосподарських полів є статистично вірогідною та пояснює 11 % варіабельності ознаки (таблиця).

Поряд з розмірами поля на показник NDVI здійснює свій вплив і така геоморфологічна ознака, як топографічні передумови поверхневого змиву ґрунту (LS-фактор). Геоморфологічні предиктори в рамках загальної лінійної моделі здатні пояснити 21 % варіабельності такого показника, як діапазон мінливості NDVI в межах поля. Зазначимо, що навесні не був знайдений статистично вірогідний вплив геоморфологічних показників на діапазон індексу NDVI. Це свідчить про те, що протягом вегетаційного періоду збільшується лімітуючий вплив на рослинний покрив факторів, перерозподіл яких обумовлений рельєфом.

Масштабну компоненту гетерогенізації відображає розмір поля. Очевидно, чим більше за площею є поле, тим більшу компоненту просторової неоднорідності екологічних умов це поле обіймає. Підкреслимо від'ємну залежність діапазону мінливості індексу NDVI від висоти рельєфу (нормований регресійний коефіцієнт $(-0,28) \pm 0,09$). Очевидно, чим вищу позицію займає поле, тим вона ближче до вирівняного плакору.

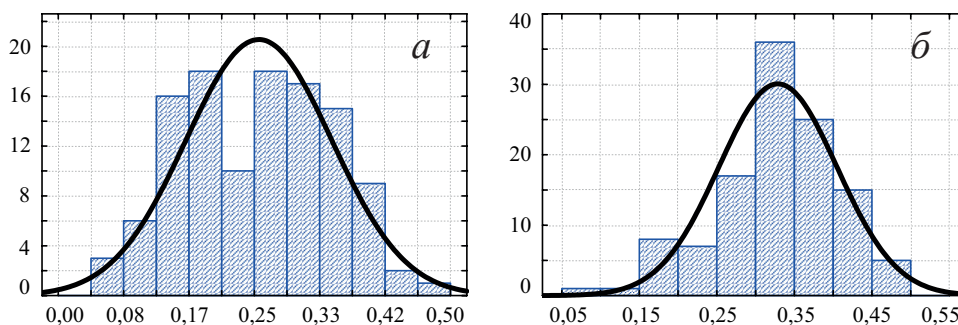


Рис. 3. Гістограми розподілу значень індексу NDVI: а – наприкінці літа; б – діапазон мінливості цього показника в межах сільськогосподарського поля (чорна лінія вказує на теоретичний нормальний розподіл)

Тобто на плакорних позиціях варіабельність індексу NDVI, а відповідно і фітомаси, менша, ніж на тих позиціях, які наближені до депресій рельєфу. Негативний вплив на варіювання індексу NDVI в межах поля здійснює її такий показник, як ФАР (нормований регресійний коефіцієнт $(-0,18) \pm 0,09$), тобто зі збільшенням ФАР неоднорідність рослинного покриву зменшується. І хоча загальний рівень сонячної радіації не є, за формальни-

ми ознаками, лімітуючим фактором в умовах Полтавської області, але існуюча рельєфна неоднорідність може збільшувати строка-тість умов, яка відбивається у суттєвих відмінностях фітомаси в межах поля. Ця обставина може бути й фактором, який сприятиме проникненню бур'янів на поле внаслідок порушення єдиного рослинного пологю, який виконує превентивну функцію для проникнення шкідливих рослин на поле.

Висновки

1. Статистичний розподіл значень індексу NDVI у весняний період описується гамма-розподілом, а наприкінці літа – нормальним розподілом.

2. Геоморфологічні предиктори навесні здатні пояснити 13, а наприкінці літа 11 % варіабельності індексу NDVI. Поряд з розмірами поля, статистично вірогідним предиктором показника NDVI є ФАР. На початкових етапах вегетаційного періоду кількість сонячної енергії, яка находитиметься до поверхні Землі в умовах Полтавської області, є вирішальною для сти-

мулювання інтенсивності зростання рослин.

3. На показник NDVI впливає й така геоморфологічна ознака, як топографічні передумови поверхневого змиву ґрунту (LS-фактор).

4. Геоморфологічні предиктори в рамках загальної лінійної моделі здатні пояснити 21 % варіабельності такого показника, як діапазон мінливості NDVI в межах поля наприкінці літа. Це свідчить про те, що протягом вегетаційного періоду збільшується лімітуючий вплив на рослинний покрив факторів, перерозподіл яких зумовлений рельєфом.

Бібліографія

1. Пространственная агроэкология и рекультивация земель: монография [Текст] / [Демидов А.А., Кобец А.С., Грицан Ю.И., Жуков А.В.]. – Днепропетровск: Изд-во “Свидлер А.Л.”, 2013. – 560 с. doi: 10.13140/RG.2.1.5175.5040

2. Ландшафтная экология как основа пространственного анализа продуктивности агроценозов [Текст] / А.В. Жуков, О.Н. Кунах, Г.А. Задорожная, Е.В. Андрусевич // Экология та ноосферология. – 2013. – Т. 24, № 1–2. – С. 68–80.

3. Жуков А.В. Ландшафтный аспект экологической ниши слепышей [Текст] / А.В. Жуков, О.Н. Кунах, Т.М. Коновалова // Біологічний вісник МДПУ ім. Б. Хмельницького – 2011. – № 3. – С. 13–27.

4. Экологическое значение пространственной изменчивости твёрдости почвы в условиях природного земледелия [Текст] / 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.

5. Estimating the leaf area index of North Central Wisconsin forests using the Landsat Thematic

Mapper [Text] / K.S. Fassnacht, S.T. Gower, M.D. MacKenzie, E.V. Nordheim, T.M. Lillesand // Remote Sensing of Environment. – 1997. – Vol. 61. – P. 229–245.

6. Jakubauskas M.E. Thematic Mapper characterization of lodgepole pine serals in Yellowstone National Park, USA [Text] / M.E. Jakubauskas // Remote Sensing of Environment. – 1996. – Vol. 56. – P. 118–132.

7. Paruelo J.M. Interannual variability of NDVI and its relationship to climate for North American shrublands and grasslands [Text] / J.M. Paruelo, W.K. Lauenroth // Journal of Biogeography. – 1998. – Vol. 25. – P. 721–733.

8. Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system [Text] / S.W. Running, P.E. Thornton, R. Nemani, J.M. Glassy; Eds. O.E. Sala, R. Jackson, H.A. Mooney, R. Hwarth // Methods in ecosystem science. – New York, Springer-Verlag. – 2000. – P. 44–57.

9. Available fuel dynamics in nine contrasting forest ecosystems in north America [Text] / S.R. Ryu, J. Chen, T.R. Crow, S.C. Saunders // Environmental Management. – 2004. – Vol. 33. – P. 87–107.

Рецензент – доктор біологічних наук,
професор **О.В. Жуков**