

ВИКОРИСТАННЯ НОРМАЛІЗОВАНОГО ДИФЕРЕНЦІЙНОГО ВЕГЕТАЦІЙНОГО ІНДЕКСУ (NDVI) ДЛЯ ОЦІНКИ РІЗНОМАНІТТЯ ДИКИХ БДЖІЛ (HYMENOPTERA, APOIDEA)

Гончар Г.Ю.

ДУ «Інститут еволюційної екології Національної академії наук України»
вул. Акад. Лебедева, 37, 03143, м. Київ
apantova@ukr.net

Дикі бджоли (Hymenoptera, Apoidea) є найкращими запилювачами більшості квіткових рослин, але внаслідок діяльності людини вони потерпають від багатьох негативних факторів впливу та скорочують чисельність популяцій в усьому світі. Міські парки, сади, сквери та інші зелені території міста набувають останнім часом більшої значимості у збереженні цих комах. Стандартні методи фауністичних досліджень полягають у ретельному зборі комах, який передбачає масове їх вилучення із природи, та мають певний сенс під час детальних досліджень їх видової та популяційної структур. Але для первинної оцінки різноманіття цих вразливих комах варто використовувати методи, які завдають найменшої шкоди природним угрупованням. Таке завдання можуть вирішити методи аналізу супутникових знімків земної поверхні і, зокрема, розроблений на основі цього нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI). Цей індекс є показником фотосинтетичної активної біомаси та характеризує продуктивність рослинних угруповань. Найголовнішим ресурсом для бджіл є пилок та нектар різноманітних видів квіткових рослин, а отже, аналізуючи стан рослинності, можна опосередковано передбачати різноманіття диких бджіл. У нашому дослідженні ми обраховували значення вегетаційного індексу у 2018 році на різних територіях Києва, а оцінка різноманіття диких бджіл була проведена за стандартними методиками. За результатами нашого дослідження виявлено значимі кореляції між різноманіттям диких бджіл, різноманіттям квіткових угруповань та значеннями вегетаційного індексу NDVI. Так, за умов зростання значення цього індексу спостерігається значне квіткове різноманіття та, відповідно, високе різноманіття диких бджіл. Низькі значення індексу NDVI (нижче 0,5) свідчать про низьке різноманіття угруповань рослин та диких бджіл.

Отже, використання індексу NDVI з урахуванням особливостей біотопу для оцінки різноманіття диких бджіл у гетерогенних міських територіях є перспективним. *Ключові слова:* Нормалізований диференційний вегетаційний індекс NDVI, індекси різноманіття, дикі бджоли, міські біотопи.

The use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to estimate the diversity of wild bees (Hymenoptera, Apoidea) Honchar H.

Wild bees (Hymenoptera, Apoidea) are important pollinators of most flowering plant species. As a result of human activity populations of many wild bees species have drastically declined worldwide. Urban parks, gardens, squares and other green areas of the city are increasingly important in the conservation of these insects. The standard methods of faunal sampling research are the careful collection of series specimens of all species which leads to their mass removal from nature and have an important statistical meaning for detailed studies of the species composition and population structure. But for an initial assessment of the diversity of these vulnerable insects, methods should be used that cause the least damage. Such a problem can be solved by methods of analysis of satellite images of the earth's surface, and in particular, a normalized differential vegetation index (NDVI) has been developed on the basis of this. This index is an indicator of photosynthetic active biomass and characterizes the productivity of plant communities. The most important resource for bees is pollen and nectar of various species of flowering plants, and therefore, by analyzing the plant community allows to indirectly estimate the diversity of wild bees.

In our study, we estimated the values of the vegetation index (NDVI) during the period 2012–2018 in various territories of Kyiv, and assessment of the diversity of wild bees was carried out according to standard methods. According to the results of our study, significant correlations between the diversity of wild bees, the variety of flower groups and the values of the index NDVI were revealed. Therefore, with an increase in the value of NDVI index, a significant flower diversity is observed, and, accordingly, high diversity of wild bees. Low values of the NDVI index (below 0.5) indicate a low diversity of plant and wild bee groups. Thus, the use of the NDVI index taking into account the characteristics of the biotope for assessing the diversity of wild bees in heterogeneous urban areas has the potential. *Key words:* Normalized differential vegetative index NDVI, diversity indices, wild bees, urban biotopes.

Постановка проблеми. Стандартизовані польові методи оцінки різноманіття тваринного чи рослинного угруповань проти супутникового дистанційного зондування є достатньо трудомісткими. Методики фауністичних досліджень вимагають, окрім постійного спостереження протягом усього сезону активності, також і вилучення об'єктів спостереження із середовища для подальшої видової ідентифікації тощо. Такі заходи є виправданими та дають змогу

цілісно оцінювати склад угруповання за багатьма параметрами (таксономічне різноманіття, чисельність, статевий склад). Утім, об'ємні дослідження з вилученням особин можуть мати негативні наслідки, призводити до скорочення популяцій різних видів та порушувати функціонування сталих систем відносин у природі. Супутникові методи з використанням космічних знімків земної поверхні різної роздільної здатності дозволяють досить ефек-

тивно аналізувати великі обсяги просторових даних (Prince et al., 1995, Eastman, et al., 2013, Tuanmu et al., 2015). Зокрема вегетаційні індекси, розрахунок яких базується на обрахуванні спектральної відбивної здатності рослин, надають змогу оцінити стан та склад рослинності, її щільність, і загалом продуктивність угруповання (Carlson et al., 1997, Jiang, et al., 2006, Pettorelli, et al., 2005, 2011, Johansen et al., 2014).

Актуальність дослідження. Дикі бджоли як одні із найкращих запилювачів більшості квіткових рослин останнім часом потерпають від дії багатьох факторів, спричинених діяльністю людини, та катастрофічно скорочують чисельність популяції (Klein et al., 2007, Potts et al., 2010, Smitley, 2018). Ці комахи харчуються нектаром та пилом, вся їхня життєдіяльність пов'язана із квітковими рослинами. Значне різноманіття диких бджіл (у світі – близько 20 000 видів (Michener, 2007) пов'язане безпосередньо із квітковим різноманіттям. Інтенсивне сільське господарство призвело до втрат різноманіття комах, тому міські біотопи стають більш значимими у збереженні диких бджіл (Winfree et al., 2009, Sanderson & Hufon, 2011). Численні парки, алеї, зони відпочинку в місті відрізняються достатнім потенціалом до збереження принаймні найбільш поширених та екологічно пластичних видів бджіл (Banaszak-Cibicka et al., 2012). Проведення повноцінного дослідження угруповань диких бджіл ускладнено саме необхідністю відлову особин, тому для первинної оцінки різноманіття краще застосовувати такі методи, які завдають найменшої шкоди природним об'єктам.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Робота виконувалась та продовжує виконуватись за НДР «Структурно-функціональні аспекти таксономічного й ценотичного біорізноманіття за різних екологічних умов». Починаючи із 2012 року було досліджено видові різноманіття диких бджіл на території Києва (згадування відповідних робіт у статті нижче), складено видові списки, висвітлено дані про трофічні зв'язки цих комах на територіях із різним ступенем антропогенного навантаження, також означені території, де зафіксовані рідкісні види та види із Червоної Книги України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Один із поширених вегетаційних індексів є нормалізований диференційний вегетаційний індекс NDVI, який характеризує міру фотосинтетичної активності біомаси (Tucker and Sellers, 1986) та чисту первинну продуктивність (Wu et al., 2014, Pettorelli et al., 2005). Навіть у невеликому просторовому масштабі він виявляє зв'язок між багатством видів рослин і безхребетних (Gould, 2000; Lassau & Hochuli, 2008). Відомо, що для рослинності індекс NDVI коливається від -1 до +1, і набуває високих значень за умов максимальних показників зеленої фітомаси (Weiss et al., 2004, Черепанов, Дружиніна, 2009). Цей індекс також є індикатором стану рослинності (Meneses-

Tovar, 2011), де його зменшення вказує на зменшення загальної біомаси (Gross, 2005).

Вважається, що для угруповань комах придатність супутникових метрик недостатньо досліджена (Hofmann et al., 2017). Використання супутникових знімків для оцінки різноманіття диких бджіл може мати регіональні особливості. Так, у субекваторіальних регіонах Індії різноманіття диких бджіл було пов'язане з високими значеннями NDVI (Basu et al., 2016), але в помірних зонах й особливо у змінених людиною екосистемах NDVI лише частково пояснює різноманіття диких бджіл (de Palma et al., 2015, Flores et al., 2018), так само, як й у тропічній зоні (Knoll et al., 2012). Загалом, різноманіття диких бджіл залежить від ландшафтної гетерогенності, що впливає на показники вегетаційного індексу (Batary et al., 2011, Boscolo et al., 2017).

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Як зазначалось вище, індекс NDVI використовувався в дослідженні різноманіття насамперед рослин та, опосередковано, тварин.

Новизна. Метою нашого дослідження є виявлення зв'язку нормалізованого диференційного вегетаційного індексу NDVI з показниками різноманіття угруповань диких бджіл та квіткових рослин на територіях міста, що раніше дослідниками не розглядалось.

Методологічне або загальнонаукове значення. Матеріали й методи дослідження. Дослідження було проведено у 2018 році на територіях міста Києва, які відрізняються за рослинним покривом, ступенем антропогенних порушень та цільовим призначенням використання: регіональний ландшафтний парк «Лиса Гора», НБС ім. М.М. Гришка НАН України, ППСМ «Феофанія», парк-урочище «Бабин Яр», ППСМ «Феофанія», парк Партизанської Слави, Нивки, Святошинський лісопарк, Дніпровські острови – о. Муромець, о. Гідропарк та вул. Заболотного, 104–148.

Для характеристики рослинного покриву обраховували значення нормалізованого диференційного вегетаційного індексу NDVI. NDVI розраховували так: $NDVI = (NIR - VIS) / (NIR + VIS)$, де NIR – спектральний коефіцієнт відбиття у ближній інфрачервоній області спектру, а VIS – спектральний коефіцієнт відбиття у видимому (червоному) діапазоні (Wu et al. 2010).

Тимчасові ряди значення NDVI були усереднені для кожного місяця та року із квітня до вересня для кожного типу модельної території.

Дослідження диких бджіл проводилось за загальноприйнятою методикою – індивідуальний відлов із квітучих рослин на трансектах (Песенко, 1982). Отримані особини комах вилучались із середовища для подальшої ідентифікації. Видовий склад та щільність квітучих рослин фіксували на визначеній площі в кожному біотопі.

Для оцінки угруповань диких бджіл та квіткових рослин використовували загальнозживані індекси різноманіття (Magurran, 2013):

– індекс домінування Сімпсона: $D = -\sum((n_i/n)^2)$, де n_i – кількість особин кожного i -виду, n – сумарна чисельність особин усіх аналізованих видів;

– індекс видового різноманіття Шеннона: $H = -\sum((n_i/n)\ln(n_i/n))$;

– індекс однорідності угруповання, значення якого зростають за умови збільшення у видовій

структурі частки масових видів: $e^{H/S}$, де H – індекс Шеннона, S – кількість видів.

Для виявлення зв'язків між досліджуваними параметрами обраховували коефіцієнт кореляції Пірсона.

Виклад основного матеріалу. Зв'язок індексу NDVI з різноманіттям рослинних угруповань

За обчисленими показниками значень вегетаційного індексу досліджувані нами території мали деякі відмінності, як сезонні, так і річні, хоча середній

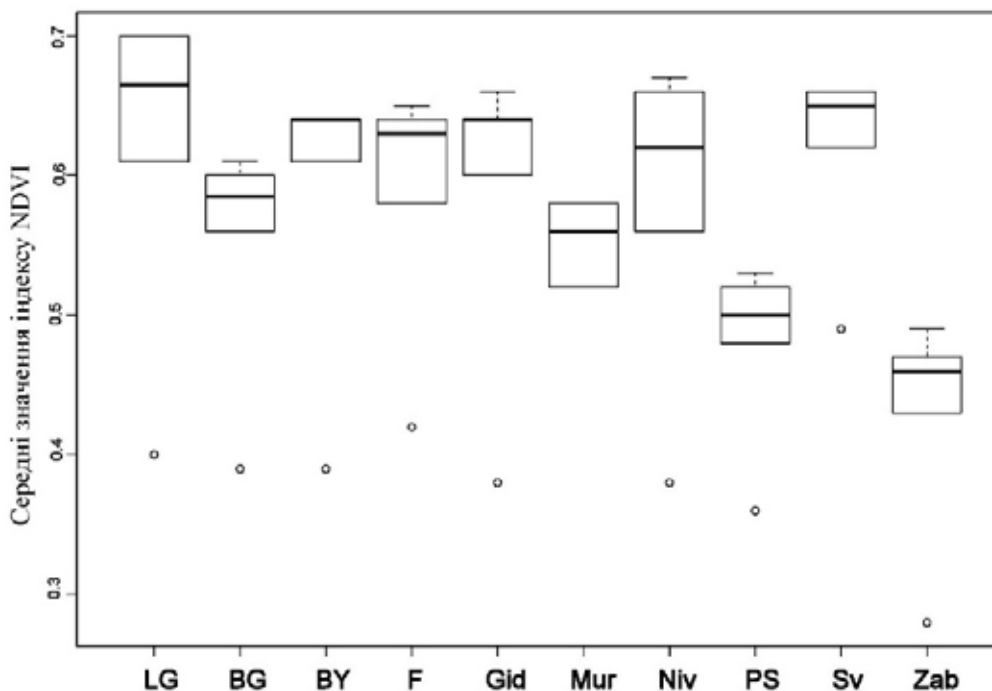


Рис. 1. Середні річні значення вегетаційного індексу NDVI у 2018 р.

Умовні позначення: LG – «Лиса Гора»; BG – НБС ім. М.М. Гришка; BY – парк-урочище «Бабин Яр»; F – ППСІМ «Феофанія»; Gid – о. Гідропарк; Mur – о. Муромець; Niv – «Нивки»; PS – парк Партизанської Слави; Sv – Святошинський лісопарк; Zab – вул. Акад. Заболотного, 104–148

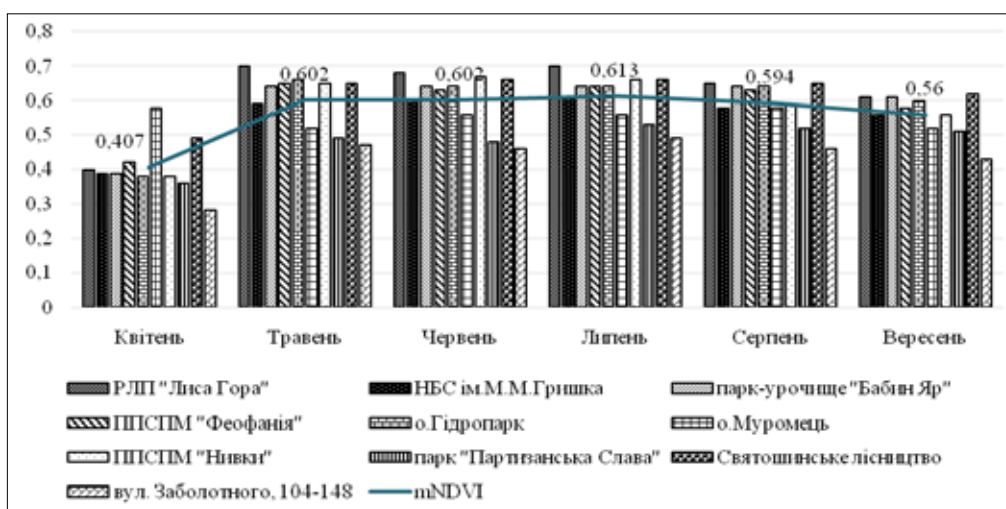


Рис. 2. Середні місячні значення для модельних територій (2018 р).
mNDVI – середнє місячне значення для міста

показник у місті в період нашого дослідження коливався від 0,51 до 0,56 (рис. 1).

На деяких із модельних територій високий показник середніх значень NDVI був зумовлений густим лісовим покривом, наприклад, «Лиса Гора» та Святошинське лісництво, а також та частина парків, які мають великі масиви лісових біотопів. Так, відповідно, сезонні відмінності в показниках значень вегетаційного індексу залежали від біотопу також (рис. 2).

Найбільш продуктивним періодом у формуванні значної зеленої біомаси є проміжок часу із травня до липня (рис.2). Серед обраних модельних територій низький середній рівень NDVI за рік та вегетаційний сезон зауважений на вул. Заболотного (104–148) – це зелені насадження вздовж автодоріг та залишки ґрунтового покриву, зайняті газонами. Досліджені Дніпровські острови мали середні значення вегетаційного індексу, що можна пояснити переважанням на цих територіях відкритих ділянок, не зайнятих лісовою рослинністю.

Між обрахованим вегетаційним індексом та індексами різноманіття угруповань квіткових рослин нами виявлені такі зв'язки (табл. 1):

Отже, різноманіття квіткових угруповань тісно пов'язане зі значеннями вегетаційного індексу, а високі значення NDVI свідчать про значне різноманіття фіторізноманіття. Відповідно, за умови збільшення домінування певного виду у структурі угруповання рослин (індекс домінування Сімпсона та однорідності угруповання), в умовах міста знижуються показники вегетаційного індексу.

Щодо угруповання диких бджіл, ми не приводимо детальний видовий склад та їх основні характеристики на обраних модельних територіях, це наведено в наших попередніх роботах (Гончар, 2017, Гончар, Гнатюк 2018, Радченко, Гончар, 2019). Загалом, для найбільших Київських парків, НБС ім. М.М. Гришка, Дніпровських островів відомо близько 230 видів диких бджіл із 44 родів, загальна таксономічна структура зображена на рис. 3.

За нашими даними Київ характеризується значним видовим різноманіттям диких бджіл, серед яких трапляються також і рідкісні види та види, котрі знаходяться під охороною Червоної Книги України. Відповідно, для існування такого різноманіття бджіл мають бути відповідні умови – достатня кількість

Таблиця 1

Коефіцієнти кореляції індексів різноманіття рослинних угруповань модельних територій та вегетаційного індексу NDVI (за 2018 рік)
(* – коефіцієнт кореляції достовірний за умови $p \leq 0.05$)

Значення NDVI	Індекс різноманіття Шеннона	Індекс домінування Сімпсона	Індекс однорідності угруповання
Квітень	0.70*	-0.68*	0.01
Травень	0.78*	-0.78*	-0.40
Червень	0.79*	-0.77*	-0.30
Липень	0.71*	-0.71*	-0.14
Серпень	0.73*	-0.73*	-0.18
Вересень	0.75*	-0.74*	-0.27

Таблиця 2

Коефіцієнти кореляції між вегетаційним індексом NDVI, індексами різноманіття квіткових рослин та угруповань диких бджіл на модельних територіях міста
(* – коефіцієнт кореляції достовірний за $p \leq 0.05$)

Індекси різноманіття та NDVI	$S_{\text{бджіл}}$	Індекс домінування Сімпсона $_{\text{бджіл}}$	Індекс різноманіття Шеннона $_{\text{бджіл}}$	Індекс однорідності угруповання $_{\text{бджіл}}$
$S_{\text{рослин}}$	0.86*	-0.61	0.73*	-0.81*
Індекс домінування Сімпсона	-0.61	0.99*	-0.98*	0.74*
Індекс різноманіття Шеннона	0.74*	-0.95*	0.98*	-0.80*
Індекс однорідності угруповання	-0.58	0.60*	-0.64*	0.74*
NDVI Квітень	0.42	-0.65*	0.66*	-0.32
NDVI Травень	0.54	-0.77*	0.76*	-0.65*
NDVI Червень	0.57	-0.74*	0.75*	-0.65*
NDVI Липень	0.34	-0.69*	0.67*	-0.36
NDVI Серпень	0.41	-0.71*	0.70*	-0.42

S – кількість видів (бджіл та квітучих рослин, відповідно).

квіткових ресурсів та необхідні місця гніздування. Загалом, місця гніздування в різних біотопах міста більш-менш наявні (бджоли роблять гнізда у ґрунті, в порожнистих стеблах рослин, у різних порожнинах). Але квіткові ресурси можуть бути недостатні.

Між різноманіттям бджіл та квіткових рослин є тісні зв'язки, адже кількість видів бджіл залежить від різноманіття квіткових рослин. За нашими даними коефіцієнт кореляції між цими показниками складає $r = -0.86$ ($p < 0.05$). Серед обрхованими нами найбільш поширеними індексами різноманіття для угруповань диких бджіл, квіткових рослин та вегетаційним індексом установлені такі коефіцієнти кореляції ($p < 0.05$) (таблиця 2).

Використані індекси різноманіття є інформативними для опису угруповань, адже дають змогу оцінити видове різноманіття, рівень домінування окремих видів, рівномірність розподілу видів в угрупованнях. Відповідно до наших даних кількість видів диких бджіл залежить від різноманіття квітового угруповання. Так, коефіцієнт кореляції між індексом різноманіття Шеннона рослинного угруповання та кількістю видів бджіл дорівнює 0,74. Нами помічений негативний зв'язок між $S_{\text{бджіл}}$ та індексом однорідності квітового угруповання ($r = -0,58$), що може свідчити про зменшення кількості видів бджіл за умови збільшення домінування окремих видів рослин. Так само видова структура цих комах стає більш нерівномірною за умови зменшення індексу різноманіття квітового угруповання.

Коефіцієнти кореляції індексу домінування Сімпсона й різноманіття Шеннона угруповань диких бджіл та вегетаційного індексу NDVI також є значимими. Але інтерпретація таких високих значень має бути обережною. Так, за умов зростання вегетаційного індексу збільшується різноманіття диких бджіл, але високі значення NDVI характерні в нашому

дослідженні для територій зі значним переважанням площ деревних насаджень та лісових біотопів. Як відомо, в помірній зоні в біотопах із переважанням широколистяних лісових культур різноманіття бджіл не є високим (Winfree et al. 2007), тому найвищі значення цього вегетаційного індексу – в не порушених, виключно лісових, біотопах не завжди тісно корелюють із різноманіттям саме бджіл. Продуктивність біотопів зі значною домішкою хвойних лісів, за нашими результатами, також мають підвищені значення (рисунки 1, 2), але так само, як і в широколистяних лісах, – різноманіття бджіл не відрізняється максимальними значеннями внаслідок відсутності численних квітучих рослин. Як зазначалось вище, різноманіття бджіл більшою мірою залежать від різноманіття квіткових рослин, які не є доміантним класом у лісових біотопах. Для території РЛП «Лиса Гора» характерні високі значення NDVI (рисунок 1) та значне різноманіття диких бджіл. Але ця місцевість містить також і великі за площею відкриті біотопи із розрідженою та лучною рослинністю і є значною мірою порушеною внаслідок антропогенного пресу, який спричинює деградацію лісових біотопів (Козир, 2013). Відповідно, ці чинники формують збільшення ролі трав'янистих квітучих рослин, що впливає на різноманіття цих комах.

Отже, між показниками різноманіття диких бджіл, квіткових угруповань та значень вегетаційного індексу наявні прямі та опосередковані зв'язки. Низькі значення вегетаційного індексу (середні значення періоду квітень–серпень – нижче 0,5) свідчать про низьке різноманіття як квіткових угруповань, так і, відповідно, диких бджіл. Більш високі значення NDVI (більше 0,62) пов'язані з рослинним різноманіттям здебільшого лісових біотопів та деревостанів, які за певних умов указують на різноманіття диких бджіл.

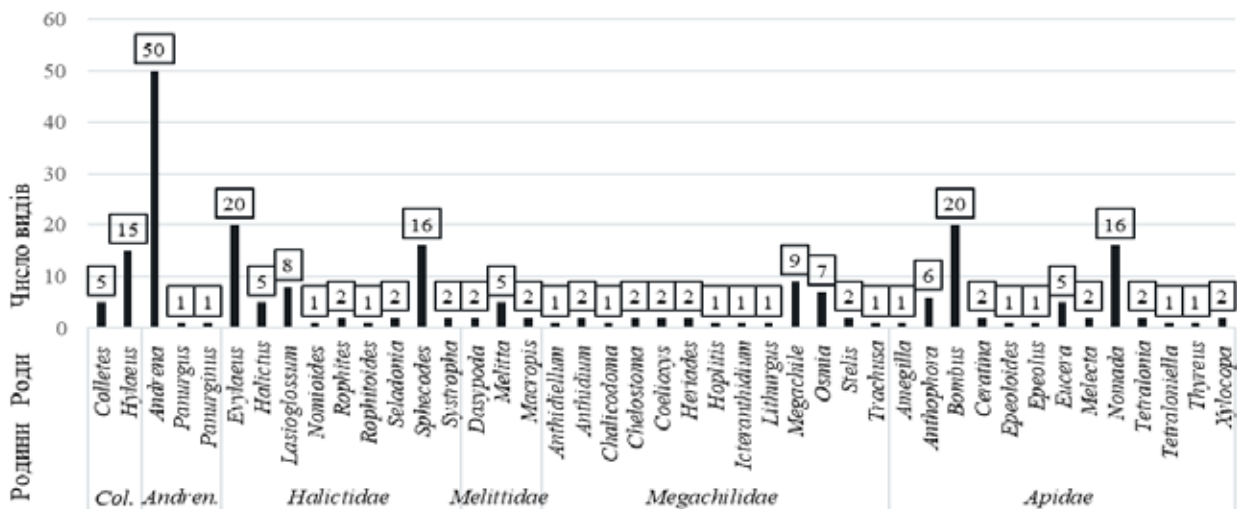


Рис. 3. Таксономічне різноманіття диких бджіл (Hymenoptera, Apoidea) на модельних територіях, м. Київ
Скорочення: Col. – родина Colletidae; Andren. – родина Andrenidae

Головні висновки. Міські парки, сквери, зелені насадження є осередками збереження біорізноманіття, зокрема багатьох квіткових рослин та комах запилювачів. З огляду на тотальне скорочення популяцій диких бджіл постає питання їх збереження, а задля цього – їх моніторингу. Для первинної оцінки рослинного різноманіття та різноманіття диких бджіл запропоновано використовувати супутникові методи діагностики земної поверхні – вегетаційний індекс NDVI.

За нашими обрахунками встановлено, що для міських біотопів різного типу (парки, сквери, тощо) значення NDVI коливалось у межах від 0,51 до 0,56, а в період найактивнішої вегетації (травень–липень) – від 0,47 до 0,7. За показниками цього індексу досліджувані території відрізнялись: найменше значення зафіксовано для зелених насаджень на вул. Заболотного, 104–148, найвищі – для РЛП «Лиса Гора».

Між показником NDVI та індексами різноманіття квіткових угруповань виявлено достовірні кореляції. Так, коефіцієнт кореляції між індексом різноманіття Шеннона та щомісячними середніми значеннями у вегетаційний сезон індексу NDVI дорівнював

у середньому $r = 0,7$ ($p \leq 0,05$), а з індексом домінування – кореляції з негативним значенням від $-0,68$.

Між показниками різноманіття угруповань диких бджіл та квіткових рослин також встановлено достовірні високі коефіцієнти кореляції. Так, між кількістю видів диких бджіл та кількістю видів квіткових рослин він дорівнював 0,86, а між індексами різноманіття бджіл та рослинних угруповань $-0,73$.

Наявність зв'язку між вегетаційним індексом NDVI та індексами різноманіття диких бджіл необхідно інтерпретувати з огляду на загальну характеристику біотопу. Виключно лісові біотопи (Святошинський ліс) мають високі значення NDVI, але низьке різноманіття саме квітучих рослин, унаслідок чого різноманіття диких бджіл на таких територіях низьке. Значення усередненого вегетаційного індексу в період із квітня до серпня нижче 0,5 характеризує збіднені угруповання.

Перспективи використання результатів дослідження: отримані нами результати можуть бути використані з метою первинного збору інформації та оцінки біорізноманіття в міських гетерогенних зелених зонах.

Література

1. Banaszak-Cibicka W., Żmihorski M. Wild bees along an urban gradient: winners and losers. *Journal of Insect Conservation*. 2012. № 16(3). P. 331–343.
2. Basu P., Parui A. K., Chatterjee S., Dutta A., Chakraborty P., Roberts S., Smith B. Scale dependent drivers of wild bee diversity in tropical heterogeneous agricultural landscapes. *Ecology and evolution*. 2016. № 6(19) P. 6983–6992.
3. Batory P., Baldi A., Kleijn D., Tschamntke T. Landscape-moderated biodiversity effects of agri-environmental management: a meta-analysis. *Proceedings of Biological Science*. 2011. № 278(1713) P. 1894–902.
4. Boscolo D., Tokumoto P., Ferreira P., Ribeiro J., DosSantos J. Positive responses of flower visiting bees to landscape heterogeneity depend on functional connectivity levels. *Perspectives in Ecology and Conservation*. 2017. № 15(1). P. 18–24.
5. Carlson T. N., Ripley D. A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote sensing of Environment*. 1997. № 62(3). P. 241–252.
6. De Palma A., Kuhlmann M., Roberts S., Potts S., Börger L., Hudson L., Lysenko I., Newbold T., Purvis A. Ecological traits affect the sensitivity of bees to land-use pressures in European agricultural landscapes. *Journal of Applied Ecology*. 2015. № 52(6). P. 1567–1577.
7. Eastman J. R., Sangermano F., Machado E. A., Rogan J., Anyamba A. Global trends in seasonality of normalized difference vegetation index (NDVI), 1982–2011. *Remote Sensing*. 2013. № 5(10). P. 4799–4818.
8. Flores L. M., Zanette L. R., Araujo F. S. Effects of habitat simplification on assemblages of cavity nesting bees and wasps in a semiarid neotropical conservation area. *Biodiversity and conservation*. 2018. № 27(2). P. 311–328.
9. Gould W. Remote sensing of vegetation, plant species richness, and regional biodiversity hotspots. *Ecological Applications*. 2000. № 10. P. 1861–1870.
10. Gross D. Monitoring agricultural biomass using NDVI time series. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 2005. 17 p.
11. Hofmann S., Everaars J., Schweiger O., Frenzel M., Bannehr L., Cord A. F. Modelling patterns of Pollinator species richness and diversity using satellite image texture *PloS one*. 2017. № 12(10).
12. Jiang Z., Huete A. R., Chen J., Chen Y., Li J., Yan G., Zhang X. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote sensing of environment*. 2006. № 101(3) P. 366–378.
13. Johansen B., Tømmervik H. The relationship between phytomass, NDVI and vegetation communities on Svalbard. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2014. № 27. P. 20–30.
14. Klein A.M., Vaissière B.E., Cane J.H., Steffan-Dewenter I., Cunningham S.A., Kremen C., Tschamntke T. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society*. 2007. № 274. P. 303–313.
15. Knoll F. D., Penatti N. C. Habitat fragmentation effects on the orchid bee communities in remnant forests of southeastern Brazil. *Neotropical entomology*. 2012. № 41(5). P. 355–365.
16. Lassau S.A., Hochuli D.F. Testing predictions of beetle community patterns derived empirically using remote sensing. *Diversity and Distributions*. 2008. № 14. P. 138–147.
17. Magurran A. E. *Measuring biological diversity*. John Wiley & Sons. 2013. 264 p.
18. Meneses-Tovar C. L. NDVI as indicator of degradation. *Unasylva*. 2011. № 62. P. 39–46.
19. Michener C. D.. *The bees of the world*. JHU press. 2007. 992 p.

20. Pettorelli N., Ryan S., Mueller T., Bunnefeld N., Jędrzejewska B., Lima M., Kausrud K. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): unforeseen successes in animal ecology. *Climate research*. 2011. 46(1). P. 15–27.
21. Pettorelli N., Vik J.O., Mysterud A., Gaillard J.M. Tucker, C.J., Stenseth N.C. Using the satellite derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*. 2005. № 20. P. 503–510.
22. Potts S.G., Biesmeijer J.C., Kremen C., Neumann P., Schweiger O., Kunin, W.E. Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology and Evolution*. 2010. № 25(6). P. 345–353.
23. Prince S.D., Goetz S.J., Goward S.N., Monitoring primary productivity from earthobserving satellites. *Water, Air, and Soil Pollution*. 1995. № 82. P. 509–522.
24. Sanderson E.W., Huron, A. Conservation in the city. *Conservation Biology*. 2011. № 25. P. 421–423.
25. Smitley D. Marketing the ecosystem services provided by food plants for pollinators. In *Proceedings of the 2017 Annual Meeting of the International Plant Propagators' Society 1212*. 2017, P. 101–102.
26. Tuanmu M-N., Jetz W. A global, remote sensing-based characterization of terrestrial habitat heterogeneity for biodiversity and ecosystem modelling. *Glob Ecol Biogeogr*. 2015. 24. P. 1329–1339.
27. Tucker C. J., Sellers P. Satellite remote sensing of primary production. *Int. J. Remote Sens*. 1986. № 7. P. 1395–1416.
28. Weiss J. L., Gutzler D. S., Coonrod J. E. A., Dahm C. N. Long-term vegetation monitoring with NDVI in a diverse semi-arid setting, central New Mexico, USA. *Journal of Arid Environments*. 2004. № 58(2). P. 249–272.
29. Winfree R., Williams N.M., Dushoff J., Kremen C. Native bees provide insurance against ongoing honey bee losses. *Ecology Letters*. 2007. № 10. P. 1105–1113.
30. Wu W., Yang P., Tang P. H., Zhou Q., Chen Z., Shibasaki R.. Characterizing spatial patterns of phenology in cropland of China based on remotely sensed data. *Agric.Sci. China*. 2010. № 9. P. 101–112.
31. Wu X., Lv M., Jin Z., Michishita R., Chen J., Tian H. Normalized difference vegetation index dynamic and spatiotemporal distribution of migratory birds in the Poyang Lake wetland. *China. Ecol. Indic*. 2014. № 47. P. 217–230.
32. Гончар Г.Ю., Гнатюк А.М. Різноманіття диких бджіл (Hymenoptera: Apoidea) Національного ботанічного саду імені М.М. Гришка НАН України. *Вісті Харків. ентомол. т-ва*. 2018. № 26(2). С. 33–42.
33. Гончар Г.Ю. Видовий состав и экологические особенности диких пчёл (Hymenoptera: Apoidea) Днепровских островов г. Киева. *Изв. Харьк. энт. о-ва*. 2017. № 25(2). С. 11–21.
34. Козир М.С. Лісова рослинність урочища «Ліса Гора» (Київ). *Екосистеми, їх оптимізація і охрана*. 2013. № 8(27). С. 71–77.
35. Песенко, Ю.А. (1982). *Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях*. Москва : Наука, 1982. 285 с.
36. Радченко В.Г., Гончар Г.Ю. Видове різноманіття диких бджіл (Hymenoptera: Apoidea) у парках Києва. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія : Біологія*. 2019. № 78(2). С. 40–49.
37. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы. *Геоматика*. 2009. № 3. С. 28–32.