

ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ПОКАЗНИКІВ СТАНУ ПАРКОВИХ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ ДЛЯ БІОІНДИКАЦІЇ АНТРОПОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Н. В. МІРОШНИК, кандидат біологічних наук, науковий співробітник

ДУ «Інститут еволюційної екології НАН України»

О. В. ТЕРТИЧНА, доктор біологічних наук, старший науковий співробітник

Інститут агроекології і природокористування НААН

І. К. ТЕСЛЕНКО, провідний інженер

ДУ «Інститут еволюційної екології НАН України»

E-mail: miroshnik_n_v@mail.ru, olyater@ukr.net

Анотація. Пріоритетним напрямом сучасних екологічних досліджень є біоіндикаційна оцінка наслідків антропогенного навантаження для довкілля. Метою статті є удосконалення методичних основ інтегрального оцінювання стану паркових лісових екосистем в умовах антропогенного навантаження та визначення напряму процесів, що в них відбуваються. Розроблено систему інтегрального оцінювання стану паркових екосистем, що включає розрахунок індексу антропогенного навантаження ($J_{ан}$) на основі 17 базових показників, індексів розвитку деградаційних процесів, структурного різноманіття (модифікованого), оцінку ризику для визначення напряму процесів та рівня дестабілізації екосистем. Додатково запроваджено коефіцієнти W , P , що враховують рівень реального рекреаційного навантаження на парки та характеристики фітоценозу як індикатори стану урбоекосистем. Для інтегрального оцінювання стану парків та біоіндикації антропогенного навантаження запропоновано застосовувати екосистемний та структурний підходи із включенням трьох векторів організації складних систем (структурно-функціональний, рівні організації живого, диференціація за екологічними нішами), з наступним аналізом ризику дестабілізації екосистем. Застосовано новий підхід до інтегрального оцінювання стану та рівня дестабілізації парків в умовах антропогенного впливу за трьома блоками. Надалі можливе зонування території, картографування з відображенням структури та векторів їх трансформації для прийняття рішень щодо збереження, відновлення та підтримання стабільності урбоекосистем.

Ключові слова: інтегральні показники; паркові лісові екосистеми; антропогенний вплив; системний, структурний підходи

Актуальність. Необхідною умовою підтримання стійкості урбоекосистем є наявність природних або частин природних екосистем у їх складі. Пріоритетним напрямом сучасних екологічних досліджень є оцінювання масштабів антропогенного навантаження, зокрема, методами

біоіндикації. Найточнішими індикаторами стану екосистем є кількісні співвідношення між різними показниками, а не абсолютні їх дані. Зокрема, для індикації динаміки і стійкості екосистем пропонують використовувати метод рангового розподілу таксонів [10]. Інтегральні показники, як об'єднання багатьох вихідних змінних в одну характеристику, можуть бути інструментом критеріальної оцінки, порівняння об'єктів між собою, вибору найкращої альтернативи, опису динаміки змін та прогнозування стану. Інформативність, точність та достовірність такого індекса залежить від правильного вибору методу обробки даних на певному етапі відповідно до поставлених завдань [1]. Тому необхідним є аналіз меж застосованості цих індексів на реальних об'єктах, що ми здійснюватимемо у паркових лісових екосистемах (ПЛЕ) м. Києва.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Інтегральне оцінювання стану екосистем у межах поселень людей проводять у Німеччині [38], Росії [33, 39]. Комплексний підхід до оцінки екосистемних послуг, запобігання екологічних ризиків для лісових та урбоекосистем – у США [26, 30], Польщі [34], Чехії [37], Китаї [22, 28, 42], Кореї [25] та інших країнах [23, 29, 32, 36]. Стан фітоценозів та зелених насаджень парків за градієнтами урбанізації у межах великих міст досліджують за різними структурними ланками лісових екосистем [24, 27, 31, 38, 40] та принципами індикації їх стійкості [35, 42]. Здійснюють інтегральне оцінювання ризиків втрати екосистем [9], ступеня окультуреності або гемеробії на видовому, екосистемному рівні [10, 27]. Розроблені індекси інтегральної оцінки антропогенного навантаження за різними показниками [5, 6, 15–17, 21]. Використовують різні комбінації характеристик екосистем, біотопів або територій [10, 13], але інтегрального індекса оцінювання стану ПЛЕ ще не існує. Нами запропонована система критеріїв і показників оцінювання антропогенного навантаження на парки м. Києва [20], модифіковано індекс структурного різноманіття (H_{str}) для характеристик ПЛЕ [19], що дає змогу оцінити вплив комплексного антропогенного навантаження на стан ПЛЕ міста, виявити найгостріші екологічні проблеми та запропонувати заходи, спрямовані на їх збереження та підтримання.

Метою дослідження є удосконалення методичних основ інтегрального оцінювання стану паркових лісових екосистем в умовах антропогенного навантаження та визначення напряму процесів, що в них відбуваються.

Матеріали і методи дослідження. Методика досліджень базується на використанні методів системного, порівняльного аналізу, польових, камеральних досліджень, аналітичній, математичній, статистичній і картографічній обробці фактичних і фондових матеріалів щодо формування і розвитку паркових екосистем у межах міста.

Результати дослідження та їх обговорення. У нашій роботі паркова лісова екосистема (ПЛЕ) – природна чи природно-антропогенна неповночленна, субсидована людиною екосистема із деревостаном чи деревно-чагарниковим фітоценозом, у межах якої просторово організовані і гармонізовані в систему природні компоненти, ландшафтні комплекси та малі архітектурні споруди, поєднані дорожньо-транспортною мережею, що разом створюють певний архітектурний ландшафтний об'єкт, природна

стійкість і структура якого підтримуються людиною; основною функцією ПЛЕ є стабілізація урбоекосистеми.

Для достовірної, точної, репрезентативної оцінки впливів на ПЛЕ використовують кількісні методи. Їх недоліком є неузгодженість точності, детальності оцінки та широти охоплення всіх чинників, що звужує область їх використання, потребує уточнень, розпорошує результати, заважає сформувати цілісне уявлення про стан ПЛЕ в даний відрізок часу (табл. 1). Тому використання інтегрованого індексу стану ПЛЕ доцільним в тих випадках, коли зручніше користуватися однозначною оцінкою: для планування природоохоронної діяльності, здійснення районування, картографування тощо.

Нами використано інтегральний індекс антропогенного навантаження ($J_{ан}$), запропонований [6, 11, 17]. На його основі модифікована для особливостей регіону, об'єкту дослідження та сформована система з 17 базових показників (табл. 2), за трьома блоками, що відображають аерозабруднення, рекреаційне навантаження, зміни біотичної складової та характеризують стан ПЛЕ в умовах урбосередовища. В $J_{ан}$ може бути введено довільну кількість різноякісних показників залежно від особливостей території та впливу, який оцінювали [5, 6, 11, 16]. Перетворення окремих базових показників у похідні здійснюватимемо шляхом нормування одним із способів [18]:

$$q = \frac{(J - \bar{J})}{\sigma}; q = \frac{J}{\bar{J}}; q = \frac{J}{J'}; q = \frac{J}{J_{max}}; q = \frac{(J - \bar{J})}{(J_{max} - J_{min})}, \quad (1)$$

де q – нормоване значення параметра J ;

J – поточне значення параметра;

\bar{J} – середнє значення параметра;

σ – середнє квадратичне відхилення;

J' – деяке нормативне (контрольне) значення параметра;

J_{max} – найбільше значення параметра;

J_{min} – найменше значення параметра J .

1. Характеристика методів кількісного інтегрального оцінювання ПЛЕ, за [14], з доповненнями

Характеристики	Методи кількісного інтегрального оцінювання					
	аналі- тичний	ста- тис- тичний	індекс- ний	аналізу чутли- вості	Дере- ва рішень	експерт- них оцінок
Оцінка	відносна	абсо- лютна	віднос- на	відносна	абсо- лютна	віднос- на
Точність оцінки	+	-	+	+	+	-
Ефективність (коректність)						
відображення реальних процесів у ПЛЕ	+	-	+	+	-	-
Урахування окремих чинників	-	-	+	-	+	-

Нами введено показник W , як характеристику загального стану процесів у ПЛЕ та індекси ступеня антропогенної трансформації, запропоновані Гончаренком [8]. ITG – нормоване співвідношення кількості геофітів і терофітів у видовому складі, має діапазон значень $[-1;1]$. ISR – співвідношення у видовому складі кількості видів (або частки, %) стрес-толерантної (S) та рудеральної (R) стратегії, діапазон значень $[-1;1]$. ICR – нормоване співвідношення віолентів та експлерентів у видовому складі [8], де T – терофіти, G – геофіти, S –патієнти, R –експлеренти, C – віоленти.

Запропоновано нормований показник P для відображення навантаження населення (та наслідків рекреації) на ПЛЕ, оскільки населення одночасно є і об'єктом впливу антропогенного навантаження, і одним з його факторів.

Для розрахунку індексу антропогенного навантаження ($J_{ан}$) на основі робіт [5, 6, 11, 16, 17] запропонована формула:

$$J_{ан} = (P \cdot W \cdot k) \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n J_i \quad (2)$$

де J_i – нормований базовий показник (табл. 2);

k – розмірний множник, $k = 10$;

n – число параметрів, $n = 17$.

W – інтегрований показник вагомості впливу [20], враховує узагальнені показники стану ПЛЕ та тенденції змін.

2. Структура базових показників інтегрального оцінювання стану ПЛЕ

№ п/п	Назва	Умовні позначення
<i>Блок 1. Аерозабруднення</i>		
1	Концентрація фітотоксикантів (середньодобова, NO_2), мг/м ³	J1
2	Кількість автомобілів, приведених одиниць	J2
<i>Блок 2. Рекреаційне навантаження</i>		
3	Кількість несанкціонованих звалищ на одиницю площі ПЛЕ (шт.); кількість слідів вогнищ (шт.) *	J3
4	Коефіцієнт рекреації [7], ум. од.	J4
5	Наявність ерозії, кількість її видів на території парку, бали *	J5
<i>Блок 3. Зміни біотичної складової</i>		
6	Індекс стану паркових насаджень [4], ум. од. *	J6
7	Наявність підросту, підліску, бали *	J7
8	Індекс адвентизації [3], ум. од.	J8
9	Індекс оцінки біорізноманіття фітоценозу та авіфауни (Індекс Шеннона)	J9
10	Індекс синантропізації угруповань птахів, що гніздяться (Jedrzcowski; Клауснітцер, 1990)	J10

11	Таксономічний склад фітоценозу * <i>Аналіз структури трав'яного ярусу</i>	J11
12	Співвідношення видів у родинях (<i>Asteraceae</i> + <i>Brassicaceae</i>) / <i>Rosaceae</i> [10]	J12
13	Співвідношення видів (фанерофіти+хамефіти) / терофіти [10]	J13
14	$ITG = (G - T) / (G + T)$ [8, с. 57]	J14
15	$ISR = (S - R) / (S + R)$ [8]	J15
16	$ICR = (C - R) / (C + R)$ [8] Похідний показник	J16
17	Інтегрований показник вагомості впливу (W)* [20]	J17

Примітка: * – показники, запропоновані нами вперше у якості базових показників

$$P = \frac{P_i}{P_{сер}}, \quad (3)$$

$$\text{де } P_i = \frac{\text{кількість населення району, чол.}}{S_1}, \text{ чол./га;} \quad (4)$$

$$P_{сер} = \frac{\text{кількість населення міста, чол.}}{S_2}, \text{ чол./га;} \quad (5)$$

S_1 – площа зелених насаджень району, га; S_2 – площа зелених насаджень міста, га.

Відмінність нашої формули від інших агрегаційних індексів [5, 6, 17] в тому, що додатково запропоновано коефіцієнти W , P , що враховують рівень реального рекреаційного навантаження на ПЛЕ та базові показники за трьома блоками, а також характеристики фітоценозу.

Наступним етапом обробки даних буде вираховання класового інтервалу за формулою [12]:

$$C = \frac{[(X_{max} - X_{min}) \cdot \lg 2]}{\lg N}, \quad (6)$$

де X_{max} – максимальне значення індексу антропогенного навантаження;

X_{min} – мінімальне значення індексу антропогенного навантаження;

N – об'єм вибірки, що відповідає числу значень індексу антропогенного навантаження у межах інтервалу (min÷max).

Статистична обробка, перевірка відповідності з нормальним розподілом, картування ПЛЕ м. Києва за рівнем антропогенного навантаження та згідно класових інтервалів індексу антропогенного навантаження ($J_{ан}$) є логічними стадіями завершення оцінювання ПЛЕ.

У діагностиці перехідних станів важливими є показники, які характеризують реакцію екосистеми на прямі і опосередковані, одиночні і комплексні, гострі і хронічні, тривалі і короткі (і т.п.) впливи антропогенних чинників. Тому розглянемо альтернативний підхід до оцінювання стану ПЛЕ,

що базується на показниках навантаження та відповіді екосистем на негативні дії чинників за трьома блоками:

Блок 1 (I_1). Аерозабруднення (NO_2 , як фітотоксикант, або інші забрудники, де $I_1 = C_i/\text{ГДК}$).

Блок 2 (I_2). Рекреаційне навантаження (показники рекреаційного впливу: частка витоптаного ґрунтового покриву; кількість несанкціонованих звалищ, слідів вогнищ, механічних пошкоджень рослин).

Блок 3 (I_3). Зміни біотичної складової (реакція екосистеми на вплив):

$$I_3 = \frac{I_c + I_{ad} + I_{zф} + I_{снт} + I_{макс}}{5}, \quad (7)$$

де I_c – індекс стану деревостану [4];

I_{ad} – індекс адвентивізації [3];

$I_{zф}$ – індекс геофітзації (частка геофітів у трав'яному ярусі) [8];

$I_{снт}$ – індекс синантропізації угруповань птахів, що гніздяться (Jedrzczkowski; Клауснітцер, 1990);

$I_{макс}$ – таксономічний склад фітоценозу (нормований до площі ПП).

Наступним етапом є оцінювання чинників довільних процесів дестабілізації і стабілізації стану ПЛЕ. Всі ці інформаційні показники ми пропонуємо згорнути в інтегральний індекс розвитку деградаційних процесів ($I_{дег}$) у ПЛЕ, який визначаємо за формулою (рис. 1):

$$I_{дег} = (I_1 + I_2 + I_3)/3. \quad (8)$$

Результати загального аналізу стану і змін в ПЛЕ можна подати у вигляді ризик–оцінки [14]:

$$Risk = R_n \cdot \ln(1 - R_n), \quad R_n = \frac{\sum I_{дег}}{\sum I_{pe}}, \quad (9)$$

де $I_{дег}$ – сума причин (векторів впливу), т.б. кількість процесів дестабілізуючої дії на систему дослідження (J1–J5);

I_{pe} – сума показників стану та відповідей екосистеми на дестабілізуючий вплив (J6–J17).

Масштабність деталізації оцінювання залежить від параметрів: цілісність (ємерджентність), ієрархічність об'єкта дослідження, складність структури і функцій, характеристик і підпорядкованості зв'язків між його елементами. У проведеному дослідженні передбачено початкову деталізацію оцінювання, а потім згортання інформації в інтегральні індекси ($J_{ан}$ – ф-ла 2; $I_{дег}$ – ф-ла 8; $Risk$ – ф-ли 9, 10). Вищий рівень оцінювання стану ПЛЕ розглядає їх як цілісну систему, не виділяючи її елементи і не встановлюючи зв'язки між ними (рис. 1).



Рис. 1. Блок-схема системи інтегрального оцінювання стану ПЛЕ в умовах комплексного антропогенного навантаження

Результатом оцінювання на основі запропонованої системи є кількісні показники, які можна використати як індикатори стану урбоєкосистем; отримана таким чином інформація про біорізноманіття може бути введена у базу даних за допомогою ГІС та візуалізована, для надання можливості покращення заходів зі збереження, підтримання, відновлення та охорони біорізноманіття. Далі можливий розрахунок порогових величин навантажень, прогнозування стану, картування джерел ризиків, моніторинг змін, а це, у свою чергу, дозволить виявити причини та наслідки цих змін або встановити чинники, що уповільнюють або прискорюють наближення екосистем до критичного стану.

Висновки і перспективи. Для кількісного інтегрального оцінювання стану ПЛЕ та біоіндикації антропогенного навантаження запропоновано застосування екосистемного і структурного підходів із включенням трьох векторів організації складних систем (структурно-функціональний, рівні організації живого, диференціація за екологічними нішами), з наступним аналізом ризику дестабілізації екосистем. Застосовано новий підхід до інтегрального оцінювання стану та рівня дестабілізації ПЛЕ в умовах антропогенного впливу за трьома блоками в три етапи. Запропоновано систему інтегрального оцінювання стану ПЛЕ в умовах комплексного антропогенного навантаження, що включає інтегральний індекс антропогенного навантаження ($J_{ан}$) на основі 17 базових показників, Індекс розвитку деградаційних процесів, Індекс структурного різноманіття (H_{str}) модифікований, оцінка ризику для визначення напряму деградаційних процесів та рівня дестабілізації паркових екосистем. Додатково

запроваджено коефіцієнти W , P , що враховують рівень реального рекреаційного навантаження на ПЛЕ та базові показники за трьома блоками, а також характеристики фітоценозу. Використання інтегрального та системного підходів може дати цікаву нову інформацію та поштовх до нових ідей та рішень. За допомогою інтегрального оцінювання надалі можливе раціональне природоохоронне зонування території, картографування з відображенням структури та векторів трансформації ПЛЕ для прийняття рішень щодо збереження та відновлення порушених екосистем, підтримання стабільності урбоекосистем великих міст.

References

1. Antomonov, M. Iu., Rusakova, L. T., Pashynska, S. L., Voloshchuk, O. V. (2014). Informatsiina tekhnolohiia konstruiuvannia intehralnykh otsinok v ekolohichnykh ta hiiienichnykh doslidzhenniakh. V kn. Aktualni pytannia zakhystu dovkillia ta zdorovia naselennia Ukrainy (rezultaty naukovykh rozrobok 2014 r.) [Information technology for the design of integrated assessments in environmental and hygienic research. In the book Topical issues of environmental protection and health of the population of Ukraine (results of scientific developments in 2014)], 391–430.
2. Bednova, O. V. (2012). Strukturnoye raznoobraziye lesnykh ekosistem kak indikator ikh narushennosti i osnova dlya prirodookhrannogo planirovaniya prostranstva gorodskikh OOPT [Structural diversity of forest ecosystems as an indicator of their disturbance and the basis for environmental protection planning of urban protected areas]. Lesnoy vestnik, 9, 16–29.
3. Burda, R. I. (2007). Rezystentnist pryrodno-zapovidnoho fondu do fito invazii [Resistance of the natural reserve fund to phytovasions]. Industrial botanist, 7, 11–21.
4. Didukh, Ya. P. (2014). Novyi pidkhid do otsinky stiiikosti ta ryzykiv vtraty ekosystem [A new approach to assessing the sustainability and risk of ecosystem losses]. References of the National Academy of Sciences of Ukraine, 8, 149–155.
5. Didukh, Ya. P. (2012). Fundamentals of bioindication. Nauk. dumka, 343.
6. Gelashvili, D. B., Basurov, V. A., Rozenberg, G. S.tain. (2003). Ekologicheskoye zonirovaniye territoriy s uchetom roli sokhranivshikhsya estestvennykh ekosistem (na primere Nizhegorodskoy oblasti) [Ecological zoning of territories, taking into account the role of the preserved natural ecosystems (on the example of the Nizhny Novgorod region)]. Volga ecological journal, 2, 99–108.
7. Gelashvili, D. B., Zaznobina, N. I. (2003). Otsenka antropogennoy nagruzki na administrativnyye rayony krupnogo promyshlennogo tsentra (na primere Nizhnego Novgoroda) [Estimation of anthropogenic load on administrative districts of a large industrial center (on the example of Nizhny Novgorod)]. Models and analysis of systems, 3, 13–24.
8. Gensiruk, S. A., Nizhnik, M. S., Voznyak, R.R. (1987). Rekreatsionnoye ispol'zovaniye lesov [Recreational use of forests]. Kyiv: Urozhay, 245.
9. Honcharenko, I.V. (2017). Fitoindykatsiia antropogennoho navantazhennia: monohrafiia [Phytindication of anthropogenic loading]. Dnipro, 127.
10. Vasenko, O.H., Rybalova, O.V., Artemjev, S.R. (2015). Intehralni ta kompleksni otsinky stanu navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha [Integral and integrated assessments of the state of the environment]. Kh: NUHZU, 419.
11. Kolomyts, E.G., Sharaya, L.S. (2013). Metody ischisleniya i kartografirovaniya ustoychivosti lesnykh ekosistem [Methods for calculating and mapping the sustainability of forest ecosystems]. News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series, 6, 126–136.

12. Kostina, N. V. (2017). Integral'naya otsenka ustoychivogo razvitiya territoriy volzhskogo basseyna s primeneniym ekspertnoy informatsionnoy sistemy region [Integral assessment of the sustainable development of the Volga basin territories using the REGION expert information system]. Tol'yatti, 22.

13. Kostina, N. V., Rozenberg, G. S., Hasayev, G. R., SHlyakhtin, G. V. (2014). Statisticheskiy analiz indeksa razvitiya chelovecheskogo potentsiala (na primere Volzhskogo basseyna) [Statistical analysis of the human development index (on the example of the Volga basin)]. Izv. Sarat. un-tat. Ser. Chemistry, biology, ecology, 14 (3), 5–70.

14. Kozulia, T. V. (2012). Osoblyvosti otsinky yakosti navkolyshnoho seredovyscha i upravlinnia ekolohichnoiu bezpekoiu z pozytsii staloho rozvytku [Features of environmental quality assessment and environmental safety management from the point of view of sustainable development]. Kyiv, 40.

15. Mandel, I. D. (1988). Klasternyy analiz. Finansy i statistika [Cluster analysis. Moscow: Finance and Statistics], 176.

16. Miroshnyk, N. V., Tertychna, O. V., Teslenko, I. K. (2018). Suchasni metodychni pidkhody do otsiniuvannya stanu parkovykh lisovykh ekosystem [Modern methodological approaches to assessing the status of park forest ecosystems]. Factors of experimental evolution of organisms, 23, 308–315.

17. Miroshnyk, N. V., Teslenko, I. K. (2018). Pidkhody do intehralnoho otsiniuvannya antropohennoho navantazhennia na parkovi lisovi ekosystemy. U kn. «Florystychni i tsenotychni riznomanittia u vidnovlenni ta zberezheni roslynnoho svitu» [Approaches to Integral Assessment of the Complex Anthropogenic Load on Park Forest Ecosystems. Floristic and Coenotic Diversity in the Restoration, Protection and Conservation of the Plant World]. Kyiv: Publishing House Lira-K, 346–367.

18. Rybak, N. V. (2015). Integral'naya otsenka ekologicheskogo sostoyaniya urbanizirovannykh territoriy [Integral assessment of the ecological status of urban areas]. Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine, 25.5, 135–145.

19. Voron, V.P., Lavrov, V.V., Bondaruk, M.A., Stelmakhova, T.F. (2011) Diahnostyka ta zonuvannya poskodzhennia lisiv Ukrainy aerotekhnohennym zabrudnenniam (metodychni rekomendatsii). Monitorynh ta pidvyshchennia stiikosti antropohenno porushenykh lisiv [Diagnostics and zoning of damage of forests of Ukraine by aerotechnogenic pollution (methodical recommendations). Monitoring and increasing the stability of anthropogenically disturbed forests]. Kharkiv: Nove slovo, 113–165.

20. Zaytsev, G.N. (1990). Matematika v eksperimental'noy botanike [Mathematics in Experimental Botany]. Moscow: Nauka, 296.

21. Zaznobina, N.I. (2007). Otsenka ekologicheskoy obstanovki v krupnom promyshlennom tsentre po stepeni antropogennoy nagruzki s pomoshch'yu obobshchennoy funktsii zhelatel'nosti (na primere g. N. Novgoroda) [Assessment of the environmental situation in a large industrial center according to the degree of anthropogenic load using the generalized desirability function (using the example of N. Novgorod)]. Bulletin of Nizhny Novgorod University. N.I. Lobachevsky, 2, 115–118.

22. Bingkui, Qiu, Huilei, Li, Min, Zhou, Lu, Zhang (2015). Vulnerability of ecosystem services provisioning to urbanization: A case of China. Ecological Indicators, 57, 505–513. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.04.025>

23. Burkhard B., Santos-Martin F., Nedkov S., Maes J. (2018). An operational framework for integrated Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services (MAES). One Ecosystem. 3: e22831. doi: <https://doi.org/10.3897/oneeco.3.e22831>

24. Buyvolova, A.Y., Trifonova, T.A., Bykova, E.P. (2018). Vegetation Indicators of Transformation in the Urban Forest Ecosystems of “Kuzminki-Lyublino” Park. In: I. Vasenev V., Dovletyarova E., Chen Z., Valentini R. (eds) Megacities 2050: Environmental

- Consequences of Urbanization. ICLASCSD 2016. Springer Geography. Springer, Cham. 118-124. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-70557-6_13
25. Choi, H.A., Song, C., Lee, W.K. et al. (2017). Integrated approaches for national ecosystem assessment in South Korea. *KSCE J Civ Eng.* 1–8. doi: [10.1007/s12205-017-1664-9](https://doi.org/10.1007/s12205-017-1664-9)
26. Graham, R.T., Quigley, T.M., Gravenmier, R. (2000). An Integrated Ecosystem Assessment of the Interior Columbia Basin. *Environ Monit Assessment*, 64 (1), 31–40. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1006482232447>
27. Hill, M.O., Roy, D.B., Thompson, K. (2002). Hemeroby, urbanity and ruderality: bioindicators of disturbance and human impact. *Journal of Applied Ecology*. 39, 708–720. doi: [10.1046/j.1365-2664.2002.00746.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2002.00746.x)
28. Ji-yuan, L., Watanabe, M., Tian-xiang, Y. et al. (2002). Integrated ecosystem assessment for western development of China. *J. Geogr. Sci.* 12 (2), 127–134. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02837466>
29. Lontzek, T.S., Narita, D., Wilms, O. (2016). Stochastic Integrated Assessment of Ecosystem Tipping Risk. *Environ Resource Econ.* 65(33), 573–598. doi: <https://doi.org/10.1007/s10640-016-0054-y>
30. McDonough, K., Hutchinson, S., Moore, T., Hutchinson, J.M. S. (2017). Analysis of publication trends in ecosystem services research. *Ecosystem Services*. 25, 82–88. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.03.022>
31. McPherson, E.G. (2006). Urban forestry in North America. *Renewable Res. J.* 4 (3), 8–12.
32. Mendelsohn, R., Rosenberg, N.J. (1994). Framework for Integrated Assessments of Global Warming Impacts. In: Frederick K.D., Rosenberg N.J. (eds) *Assessing the Impacts of Climate Change on Natural Resource Systems*. Springer, Dordrecht. 15–44. doi: https://doi.org/10.1007/978-94-011-0207-0_2
33. Mikhailova, T.A., Pleshanov, A.S., Afanasieva, L.V. (2011). Cartographic assessment of pollution of forest ecosystems on the Baikal natural territory by technogenic emissions. *Miting Adapt Strateg Glob Change*. 16, 247–266. doi: [10.1007/s11027-010-9254-x](https://doi.org/10.1007/s11027-010-9254-x)
34. Mill, W. (2000). Integrated Modelling of Acidification Effects to Forest Ecosystems – Model Sonox. In: Satake K. et al. (eds). *Acid rain 2000*, 1289–1294. Springer, Dordrecht. doi: https://doi.org/10.1007/978-94-007-0810-5_62
35. Muller, F. (2005). Indicating ecosystem and landscape organisation. *Ecological Indicators*. 5 (4), 280–294. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.03.017>
36. Nikolov, P., Bratanova-Doncheva, S. (2017). Mapping and assessment of urban ecosystem condition and services using integrated index of spatial structure. *One Ecosystem*. 2, e14499. doi: <https://doi.org/10.3897/oneeco.2.e14499>
37. Pártl, A., Vačkář, D., Loučková, B. et al. (2017). A spatial analysis of integrated risk: vulnerability of ecosystem services provisioning to different hazards in the Czech Republic. *Nat Hazards*. 89 (3), 1185–1204. doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3015-z>
38. Seidling, W. (2005). Outline and examples for integrated evaluations of data from the intensive (Level II) monitoring of forest ecosystems in Germany. *Eur J Forest Res.* 124 (4), 273–287. doi: <https://doi.org/10.1007/s10342-005-0083-5>
39. Venevsky, S.A. (2006). Method for Integrated Assessment of Vulnerability to Climate Change in Siberian Forests: Example of Larch Area. *Mitig Adapt Strat Glob Change*. 11 (1), 241–268. doi: <https://doi.org/10.1007/s11027-006-1024-4>
40. Veselkin, D.V., Galako, V.A., Vlasenko, V.E. et al. (2015). Relationship between the characteristics of the state of Scots pine trees and tree stands in a large industrial city. *Contemp. Probl. Ecol.* 8, 243.

41. Vogt, K.A., Gordon, J.C., Wargo, J.P. et al. (1997). Detecting Resistance and Resilience of Ecosystems. In: Ecosystems. Springer, New York, NY. 187–265. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1908-8_4.

42. Xu, X., Xu, L., Yan, L. et al. (2015). Integrated regional ecological risk assessment of multi-ecosystems under multi-disasters: a case study of China Environ Earth Sci. Environmental Earth Sciences. 74 (1), 747–758. doi: <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4079-2>.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОСТОЯНИЯ ПАРКОВЫХ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ДЛЯ БИОИНДИКАЦИИ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

Н. В. Мирошник, О. В. Тертичная, И. К. Тесленко

Аннотация. *Приоритетным направлением современных экологических исследований является биоиндикационная оценка последствий антропогенной нагрузки для окружающей среды. Цель – усовершенствование методических основ интегрального оценивания состояния парковых лесных экосистем в условиях антропогенной нагрузки и определения направления процессов, в них происходящих. Разработана система интегрального оценивания состояния парковых экосистем, включающая расчет индекса антропогенной нагрузки на основе 17 базовых показателей, Индекса развития деградационных процессов, Индекса структурного разнообразия (модифицированного), оценку риска для определения направления процессов и уровня дестабилизации экосистем. Дополнительно введены коэффициенты W , P , учитывающие уровень реальной рекреационной нагрузки на парки и характеристики фитоценоза, как индикаторы состояния урбоэкосистем. Для интегрального оценивания состояния парков и биоиндикации антропогенной нагрузки предлагается применять экосистемный и структурный подходы с включением трех векторов организации сложных систем (структурно-функциональный, уровни организации живого, дифференциация по экологическим нишам) с последующим анализом риска дестабилизации экосистем. Применен новый подход к интегральному оцениванию состояния и уровня дестабилизации парков в условиях антропогенного воздействия по трем блокам. В дальнейшем возможно зонирование территории, картографирование с отражением структуры и векторов их трансформации для принятия решений относительно сохранения, восстановления и поддержания стабильности урбоэкосистем.*

Ключевые слова: *интегральные показатели; парковые лесные экосистемы; антропогенное воздействие; системный, структурный подходы*

THE USE OF INTEGRAL INDICATORS OF THE CONDITION OF FOREST ECOSYSTEMS PARK FOR BIOINDICATION OF ANTHROPOGENIC LOAD

N. Miroshnyk, O. Tertychna, I. Teslenko

Abstract. *The priority direction of modern environmental research is bioindicating impact assessment of anthropogenic load on the environment. The purpose of the article is improvement of methodical bases of the integrated assessment of the state of forest ecosystems parks in conditions of anthropogenic load and determine the direction of processes in them. The developed system of integrated assessment of the condition of Park ecosystems, including the calculation of the index of anthropogenic load on the basis of 17 indicators, development Index of degradation processes, structural diversity Index (modified), a risk assessment to determine the direction of degradation processes and the level of destabilization ecosystems. Additionally introduced coefficient W , R , taking into account the real level of recreational pressure on parks and the characteristics of phytocenosis, as indicators of the state urbanocosystem. For integral estimation of the state parks and bioindication of anthropogenic load, one should apply ecosystemic and structural approaches with the inclusion of three vectors of the organization of complex systems (structural-functional organization, levels of organization of living, differentiation in ecological niches), with subsequent analysis of risk destabilization of ecosystems. Used a new approach to the integral estimation of the state and the level of destabilization of the parks in conditions of anthropogenic impact with three blocks. In the future possible a territorial zoning reflecting the structure of vectors and their transformation for decision-making concerning conservation, restoration and maintenance of stability of urbanoecosystem.*

Keywords: *integral indices; Park forest ecosystem; human impact; systemic, structural approaches.*