

В.Б. НЕБЕСНИЙ¹, Г.А. ГРОДЗИНСЬКА²

¹Інститут еволюційної екології НАН України
вул. акад. Лебедева, 37, м. Київ, 03143, Україна
nebvit@gmail.com

²Інститут ботаніки імені М.Г. Холодного НАН України
вул. Терещенківська, 2, м. Київ, 01601, Україна
agrodz@ukr.net

ОЦІНКА ТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ м. КИЄВА ЗА СПЕКТРАЛЬНИМИ ВІДБИВНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЛИСТКІВ *TILIA CORDATA* (*TILIACEAE*)

Небесний В.Б., Гродзинська Г.А. Оцінка техногенного забруднення м. Києва за спектральними відбивними характеристиками листків *Tilia cordata* (*Tiliaceae*). – Укр. ботан. журн. – 2015. – 72(2): 116–121.

Для комплексної оцінки техногенного забруднення м. Києва використовували спектрофотометричний метод вимірювання відбивних характеристик листків біоіндикаторного виду *Tilia cordata* Mill. Як найбільш інформативний показник, що визначає стан рослини (за ступенем пригнічення фотосинтезу), обраний індекс стресу (зворотний вегетаційний індекс). Дослідження відбивних характеристик понад 500 листків *Tilia cordata* з 17 локалітетів 7 адміністративних районів м. Києва дали змогу визначити тенденцію зростання індексу стресу за градієнтом інтенсивності транспортного потоку. На основі отриманих результатів рекомендовано застосування даного методу для екологічного моніторингу якості довкілля, оперативного оцінювання екологічних змін в урбоекосистемах.

Ключові слова: *Tilia cordata*, урбоекосистеми, техногенне забруднення, індекс стресу

Вступ

Урбанізовані території вирізняються своєрідністю екологічних факторів, комплексом техногенних впливів, що призводять до суттєвої трансформації довкілля. Рослини вважаються надійними індикаторами забруднення навколишнього природного середовища токсичними речовинами, оскільки вони змушені адаптуватися до стресу шляхом фізіолого-біохімічних та анатомо-морфологічних перебудов організму. Фіксація й оцінка цих змін, які можуть реєструватися вже на ранніх стадіях деградації, дають достовірну картину умов місцезростання рослин і віддзеркалюють стан міського середовища (Nikolaevskii, 1999; Maidebura, 2006; Lutsyshyn, 2010; Didukh, 2012). Упродовж останніх десятиліть посилення впливу негативних факторів, характерних для урбанізованих територій, спричиняє ослаблення рослинності, передчасне старіння, зниження її продуктивності, ураження хворобами, шкідниками і, насамкінець, загибель насаджень.

Кількість екологічно чистих зон і парків як у межах міської смуги, так і на прилеглих територіях, невпинно зменшується, і вони набувають дедалі більшої цінності (Andreeva, 2006).

Найпоширенішими та найнебезпечнішими для екологічного стану ґрунтів і вод урбанізованих територій є забруднення їх важкими металами. Відомо, що насичення ґрунту солями важких металів нерідко призводить до загибелі рослинних угруповань (Artamonov, 1986). Наслідком забруднення атмосферного повітря та ґрунту є зміна пігментного складу рослин, що, в свою чергу, проявляється в змінах оптичних властивостей (Andreeva, 2006 b). При цьому також змінюються спектральні відбивні характеристики рослинності, що дає змогу використовувати їх з метою біоіндикації рівнів техногенного забруднення. Комплексний аналіз змін цих параметрів може слугувати основою для розробки дистанційних методів діагностики стану урбоекосистем (Andreeva, 2006b; Andreeva, 2007).

Низкою дослідників доведено існування залежності між зміною оптичних параметрів зелених рослин і їхнім фізіологічним станом. Зокрема встановлено, що спектральні коефіцієнти відбиття зелених листків корелюють із рівнем їх фотосинтетичної активності (Kondratev, 1982; Levanchuk, 2005). Оскільки процес фотосинтезу дуже чутливо реагує на вплив факторів зовнішнього середовища, за зміною його інтенсивності можна визначити реакцію рослин на стресори, зокрема на забруднення повітря (Andreev, 2013; Khavaninzadeh et al., 2014).

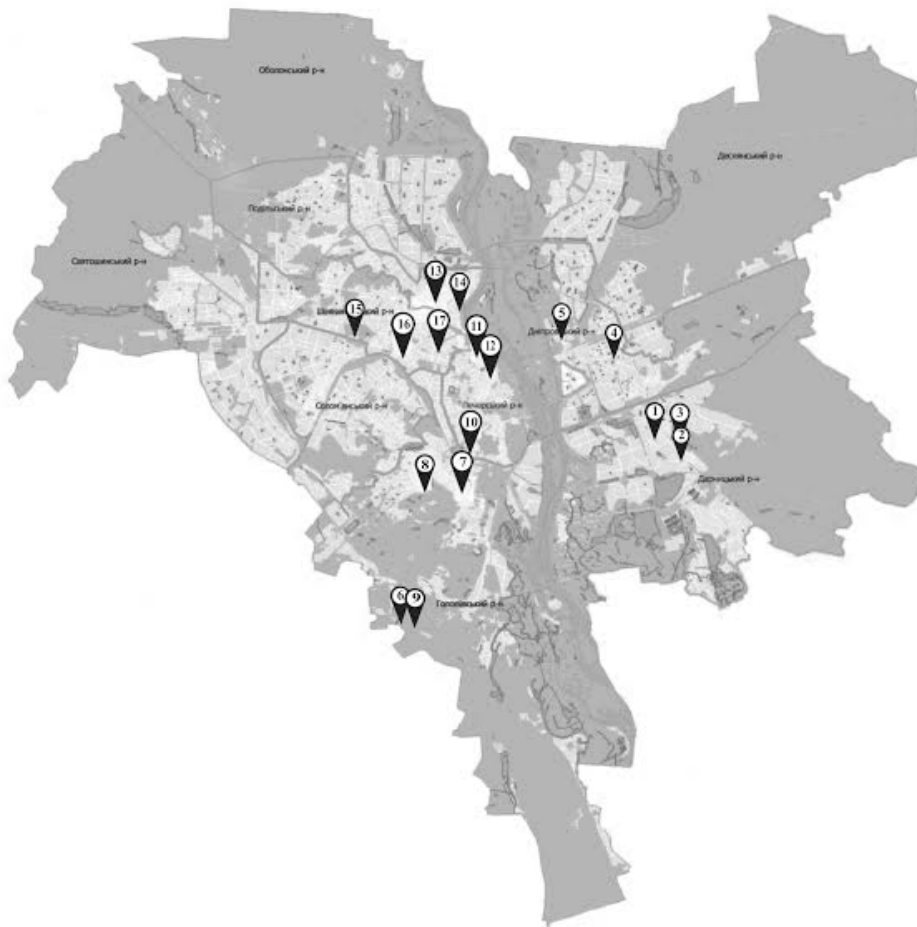


Рис. 1. Схема відбору проб у м. Києві (2014 р.):

Дарницький р-н – (1) вул. архітектора Вербицького, 6; (2) Харківське шосе, 180/21; (3) Харківське шосе, 129;
Деснянський р-н – (4) вул. Магнітогорська, 1 (ВАТ «Хімволокно»);
Дніпровський р-н – (5) вул. Луначарського;
Голосіївський р-н – (6) вул. Метрологічна, 4–12; (7) проспект Науки, 32; (8) проспект Голосіївський, 88; (9) Парк-пам'ятка садово-паркового мистецтва «Феофанія»;
Печерський р-н – (10) бульвар Дружби народів; (11) вул. Грушевського, 6; (12) Маріїнський парк;
Подільський р-н – (13) вул. Верхній Вал, 4–6; (14) вул. Набережно-Хрещатицька, 35 і вул. Хорива, 50;
Шевченківський р-н – (15) парк ім. О.С. Пушкіна; (16) проспект Перемоги, 4; (17) вул. Хрещатик (ріг вул. Прорізної).

Fig.1. Sampling sites in Kyiv (2014)

Symbols indicate:

Darnitskyi district – (1) Arkhitektor Verbytskyi St., 6; (2) Kharkiv Highway 180/21 ; (3) Kharkiv Highway, 129 ;
Desnyanskyi district – (4) Magnitogorska St., 1 (JSC"Khimvolokno");
Dniprovskyi district – (5) Lunacharsky St. ;
Holosiivskyi district – (6) Metrologichna St., 4–12; (7) Nauki Ave., 32; (8) Holosiivskyi Ave., 88; (9) Park Feofania;
Pecherskyi district – (10) Druzhby Narodiv Blvd.; (11) Grushevskogo St., 6; (12) Mariinsky Park ;
Podilskyi district – (13) Verkhniy Val St., 4–6; (14) Naberezhno-Khreschatytska St., 35; Khoryva St., 50;
Shevchenkivskyi district – (15) Pushkin park; (16) Peremogi Ave., 4 ; (17) Khreschatyk St.(at the corner of Prorizna St.)

Метою нашого дослідження була оцінка стану біоіндикаторного виду – *Tilia cordata* Mill., що зростає в межах м. Києва, за аналізом зміни спектральних відбивних характеристик її листя.

Об'єкти та методи дослідження

Ми дослідили понад 500 зразків листків *T. cordata* з 17 локалітетів (із різним ступенем антропогенного і техногенного забруднення) в межах м. Києва (рис.1).

Для комплексної оцінки техногенного впливу застосували спектрофотометричний метод, заснований на вимірюванні біологічних реакцій рослин (Levanchuk, 2005). З метою реєстрації цих реакцій використовували польовий фотометр ПФ-8, принцип роботи якого полягає у здатності досліджуваних об'єктів вибірково відбивати променеву енергію в характерних ділянках спектра. Спектральні діапазони фотометра підібрані таким чином, щоби вони відповідали основним фізіологічним процесам, які відбуваються в рослинах (Surin, 1998).

Як найбільш інформативний показник ми обрали індекс стресу (зворотний вегетаційний індекс), що характеризує стан рослини та визначає ступінь пригнічення фотосинтезу. Загалом нині відомо близько 160 варіантів вегетаційних індексів (Cherapanov, 2009). Їх обирають експериментально (емпіричним шляхом), виходячи з відомих особливостей кривих спектральної відбивної здатності рослинності та ґрунтів. Розрахунок більшої частини вегетаційних індексів ґрунтується на кількох найстабільніших (які не залежать від інших факторів) ділянках кривої спектральної відбивної здатності рослин. На червону зону спектра (0,62–0,75 мкм) припадає максимум поглинання сонячної радіації хлорофілом, у зеленій зоні (0,55 мкм) відбиття пов'язане з пігментним складом листка, у ближній інфрачервоній (0,75–1,30 мкм) фіксується максимальне відбиття енергії клітинною структурою листка. А.С. Черепанов і О.Г. Дружиніна (Cherapanov, Druzhinina, 2009) відзначають, що висока фотосинтетична активність (пов'язана, як правило, зі збільшенням фітомаси) призводить до нижчих коефіцієнтів відбиття у червоній зоні спектра і до більших значень у ближній інфрачервоній. Як відомо, співвідношення цих показників уможливорює чітке відокремлення рослинності від інших природних об'єктів (Motohka et al., 2010).

Спектральні коефіцієнти відбиття (СКВ) листків *T. cordata* вимірювались у зеленій – R1 (551,9 нм), червоній – R2 (656,8 нм) та ближній інфрачервоній – R3 (802,0 нм) зонах спектра. Вимірюваний коефіцієнт відбиття в зазначених спектральних діапазонах коливався в межах від 0 до 1. Наведена гранична відносна похибка вимірювань становила близько 2,3 %. На основі виконаних вимірювань ми розраховували індекс стресу за формулою $IC=R1/R3$, який чисельно характеризує ступінь пригнічення рослин (Surin, 2011).

Результати досліджень та їх обговорення

Обраний нами індекс стресу (IC), з одного боку, є індикатором стану рослини, а з другого – слугує мірою антропогенного навантаження на рослини і, відповідно, на середовище їхнього існування. Цей показник особливо зручний для дослідження комплексного антропогенного впливу (забруднення ґрунту й атмосфери) на екосистему. За низьких значень IC продуктивність фотосинтезу вища і, відповідно, кращим є стан екосистеми загалом.

Для проведення моніторингу ми обрали місця збору зразків із різною передбачуваною інтенсивністю антропогенного навантаження. Наші дослідження показали, що місцезростання з інтенсивним транспортним навантаженням (проспект Науки, проспект Перемоги, вул. Набережно-Хрещатицька, Голосіївський проспект), а також вул. Грушевського (під час лютневих подій 2014 р. тут у докільця викидалися продукти згорання автомобільних шин) належать до зони сильного забруднення. Індекси стресу там перебували в межах від 0,230 до 0,240 (рис. 2).

Зона середнього забруднення була розділена на дві підзони, до першої з яких ми віднесли вул. Метрологічну, вул. Верхній Вал, Харківське шосе (вздовж магістралі) та парк імені О.С. Пушкіна зі значеннями індексу стресу від 0,215 до 0,219. Зауважимо, що до проведення вимірювань зазначений парк ми розглядали як зону з потенційно слабким антропогенним навантаженням. Проте отримані дані свідчать про суттєвий вплив на стан обраного біоіндикатора (*T. cordata*) близького розташування досліджуваного об'єкта до проспекта Перемоги та промзони заводу «Більшовик» (значення IC – 0,216).

Для другої підзони – бульвар Дружби народів, вул. Хрещатик, Маріїнський парк, вул. Луначарського, вул. архітектора Вербицького – індекс стресу був у діапазоні 0,187 – 0,201.

Слабкий рівень антропогенного навантаження виявлений на Харківському шосе (відстань від траси – 20 м, у дворі житлового будинку), вул. Магнітогорській і в парку-пам'ятці садово-паркового мистецтва (ППСПМ) «Феофанія»: тут значення IC коливалися від 0,137 до 0,167.

Таким чином, результати проведеного дослідження спектральних відбивних характеристик біоіндикаторного виду *Tilia cordata* виявили тенденцію до зростання індексу стресу за градієнтом інтенсивності транспортного потоку в м. Києві.

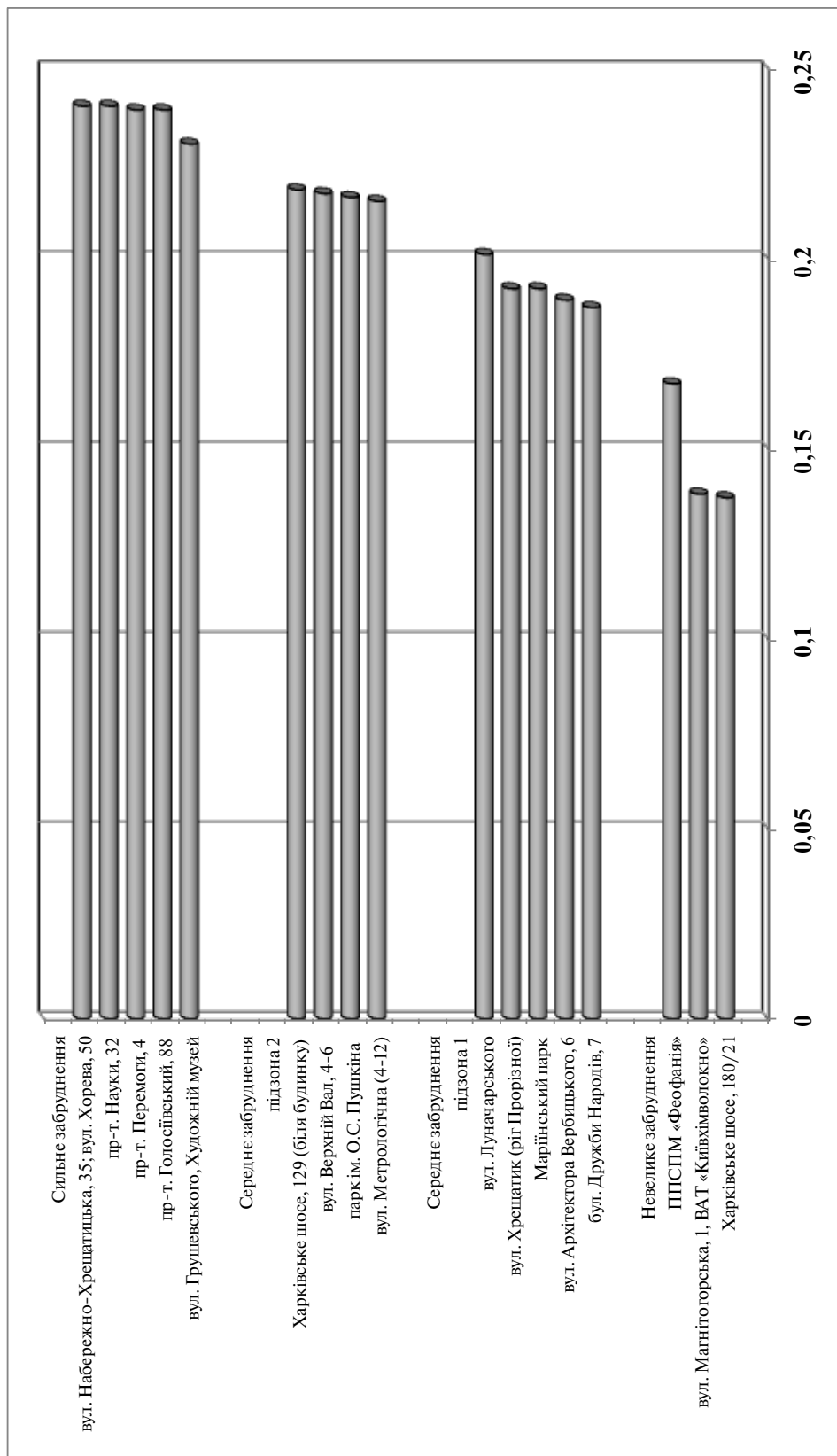


Рис. 2. Зонування техногенного навантаження м. Києва за індексом стресу (2014 р.)
 Fig. 2. Anthropogenic pressure zoning of Kyiv by a stress index (2014)

Отже, біоіндикація стану довкілля за спектральними характеристиками листків *T. cordata* є інноваційним перспективним методом (*in situ*) контролю за станом довкілля.

Висновки

1. Дослідження спектральних відбивних характеристик біоіндикаторного виду *Tilia cordata* уможливило виявлення тенденції зростання індексу стресу за градієнтом інтенсивності транспортного потоку в м. Києві.
2. Використання методу дає можливість на основі оптичних вимірювань фіксувати і вивчати стадійність реакцій рослин на дію природних та антропогенних стресорів, діагностувати адаптаційну фазу, фазу порушеної стійкості та фазу незворотних змін, кожній із яких притаманні свої фізіологічні механізми пригнічення та закономірності накопичення полютантів.
3. Отримані результати дають підстави рекомендувати метод визначення індексу стресу рослин для екологічного моніторингу якості довкілля, можливості оперативно оцінювати екологічні зміни та своєчасно реагувати на негативні техногенні впливи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Andreeva A.V., Buznikov A.A., Timofeev A.A., Alekseeva-Popova N.V., Beliaeva A.I.*, 2006. – *Sovremen. problemy distancion. zondirovaniia Zemli iz Kosmosa: Fiz. osnovy, metody i tekhnol. monitoringa okruzhaiushchei sredy, potencialno opasnykh iavlenii i obektov.* – Вып. 3. – 2. – P. 265–270 [*Андреева А.В., Бузников А.А., Тимофеев А.А., Алексеева-Попова Н.В., Беляева А.И.* Оценка экологического состояния окружающей среды по спектрам отражения индикаторных видов растительности // *Современ. проблемы дистанцион. зондирования Земли из Космоса: Физ. основы, методы и технол. мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов.* – 2006. – Вып. 3. – Т. 2. – С. 265–270].
- Andreeva A.V., Buznikov A.A., Timofeev A.A., Skriabin S.V.*, 2006. – *Izv. SPbGETU «LETI».* – Вып.1.– P. 31–38 [*Андреева А.В., Бузников А.А., Тимофеев А.А., Скрябин С.В.* Спектральные исследования техногенной нагрузки на растительность мегаполисов // *Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ».* – 2006. – Вып.1. – С. 31–38].
- Andreeva A.V., Buznikov A.A., Skriabin S.V., Timofeev A.A., Alekseeva-Popova N.V., Beliaeva A.I.*, 2007. – *Sovremen. problemy distancionnogo zondirovaniia Zemli iz Kosmosa.* – Вып. 4. – 2. – P. 175–182 [*Андреева А.В., Бузников А.А., Скрябин С.В., Тимофеев А.А., Алексеева-Попова Н.В., Беляева А.И.* Исследование характера изменения оптических характеристик растительности под воздействием тяжелых металлов для разработки метода дистанционной диагностики загрязнения // *Современ. проблемы дистанцион. зондирования Земли из Космоса.* – 2007. – Вып. 4. – Т. 2. – С. 175–182].
- Andreev D.N.*, 2013. – *Biodiagnostika v ekol. otcenke pochv i sopredelnykh sred. Tez. dokl. Mezhdunar. konf. (4–6 fevralia 2013, Moskva).* – P. 12 [*Андреев Д.Н.* Биоиндикация состояния окружающей среды по флуоресценции хлорофилла хвои сосны обыкновенной // *Биодиагностика в экол. оценке почв и сопредельных сред: Тез. докл. Междунар. конф. (4–6 февраля 2013 г., г. Москва).* – С. 12].
- Artamonov V.I.*, 1986. – М.: Наука. – 86 p. [*Артамонов В.И.* Растения и чистота природной среды. – М.: Наука, 1986. – 86 с.].
- Cherepanov A.S., Druzhinina E.G.*, 2009. – *Geomatika.* – № 3. – P. 28–32 [*Черепанов А.С., Дружинина Е.Г.* Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // *Геоматика.* – 2009. – № 3. – С. 28–32].
- Didukh Ya.P.*, 2012. – К.: Nauk. dumka. – 344 p. [*Дідух Я.П.* Основы біоіндикації. – К.: Наук. думка, 2012. – 344 с.].
- Khavaninzadeh A.R., Veroustraete F., Buytaert J.A.N., Samson R.* Leaf injury symptoms of *Tilia* sp. as an indicator of urban habitat quality // *Ecol. indicators.* – 2014. – 41. – P. 58–64.
- Kondratev K.Ia., Fedchenko P.P.*, 1982. – Л.: Гидрометеоздат. – 216 p. [*Кондратьев К.Я., Федченко П.П.* Спектральная отражательная способность и распознавание растительности. – Л.: Гидрометеоздат, 1982. – 216 с.].
- Levanchuk A.V., Kopytenkova O.I., Nekhoroshev A.S., Gaiko I.I.*, 2005. – *Uspekhi sovremen. estestvoznaniia.* – № 9. – P. 59–61 [*Леванчук А.В., Копытенкова О.И., Нехорошев А.С., Гайко И.И.* Метод контроля качества среды обитания в мегаполисе // *Успехи современ. естествознания.* – 2005. – № 9. – С. 59–61].
- Lutsyshyn O.H., Radchenko V.H., Palapa N.V., Yavorovskiy P.P.*, 2010. – *Dop. NAN Ukrainy.* – № 6. – P. 180–187 [*Луцишин О.Г., Радченко В.Г., Палапа Н.В., Яворовський П.П.* Макроморфологічні зміни реакції-відповіді рослинних організмів деревних вуличних насаджень Київського мегаполіса при стресовому рівні техногенного забруднення // *Доп. НАН України.* – 2010. – № 6. – С. 180–187].
- Maidebura I.S.*, 2006. – *Vliianie zagriazneniia vozdushnogo basseina goroda Kaliningrada na anatomo-morfologicheskie i biokhimicheskie pokazateli drevesnykh rastenii: Avtoref. dis... kand. biol. nauk.* – Kaliningrad. – 22 p. [*Майдебуря И.С.* Влияние загрязнения воздушного бассейна города Калининграда на анатомо-морфологические и биохимические показатели древесных растений: Автореф. дис... канд. биол. наук. – Калининград, 2006. – 22 с.].
- Motohka T., Nasahara K.N., Oguma H., Tsuchida S.* Applicability of Green-Red Vegetation Index for remote sensing of vegetation phenology // *Remote Sensing.* – 2010. – 2. – P. 2369–2387.

Nikolaevskii V.S., 1999. — М.: MGUL. — 193 p. [Николаевский В.С. Экологическая оценка загрязнения среды и состояние наземных экосистем методами фитоиндикаций. — М.: МГУЛ, 1999. — 193 с.].

Surin V.G., 1998. — Issled. Zemli iz Kosmosa. — № 4. — P. 38–44 [Сурин В.Г. Метод полевой прецизионной фотометрии для интерпретации геохимических аномалий // Исслед. Земли из Космоса. — 1998. — № 4. — С. 38–44].

Surin V.G., 2011. — Agrofizika. — № 2. — P. 39–49 [Сурин В.Г. Активные оптические тестеры для информационного обеспечения точного земледелия, точного животноводства и экологической безопасности // Агрофизика. — 2011. — № 2. — С. 39–49].

Рекомендує до друку О.К. Золотарьова Надійшла 17.02.2015 р.

Небесный В.Б.¹, Гродзинская А.А.² **Оценка техногенного загрязнения г. Киева по спектральным отражательным характеристикам листьев *Tilia cordata* (Tiliaceae).** — Укр. ботан. журн. — 2015. — 72(2): 116–121.

¹Институт эволюционной экологии НАН Украины, г. Киев

²Институт ботаники имени Н.Г. Холодного НАН Украины, г. Киев

Для комплексной оценки техногенного загрязнения г. Киева использовали спектрофотометрический метод измерения отражательных характеристик листьев биоиндикаторного вида *Tilia cordata* Mill. Как наиболее информативный показатель, определяющий состояние растения (по степени угнетения фотосинтеза), был выбран индекс стресса (обратный вегетационный индекс). Исследования отражательных характеристик бо-

лее 500 листовых пластинок *T. cordata* из 17 локалитетов семи административных районов г. Киева позволили выявить тенденцию к увеличению индекса стресса по градиенту интенсивности транспортного потока. На основе полученных результатов рекомендуется использование данного метода для экологического мониторинга качества среды, оперативной оценки актуальных экологических изменений в урбоэкосистемах.

Ключевые слова: *Tilia cordata*, урбоэкосистемы, техногенное загрязнение, индекс стресса.

Nebesnyi V.B.¹, Grodzynska G.A.² **An assessment of industrial pollution of Kyiv with the spectral reflection of *Tilia cordata* (Tiliaceae) leaves.** — Ukr. Bot. J. — 2015. — 72(2): 116–121.

¹Institute for Evolutionary Ecology, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

²M.G. Kholodny Institute of Botany, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

Complex estimation of industrial pollution in Kyiv using spectrophotometric method for measuring the reflection characteristics of leaves of a bioindicator species, *Tilia cordata* Mill., was held. As the most informative indicator that determines the state of the plant (by inhibition of the photosynthesis), we selected the index of stress (reverse vegetation index). Studies on reflective characteristics of more than 500 leaves of *T. cordata* from 17 habitats in 7 administrative districts of Kyiv has revealed a trend of increasing index of stress along the gradient of traffic intensity. On the base of obtained results it is recommended to use this method for monitoring of environmental quality and rapid assessment of current environmental changes in urban ecosystems.

Key words: *Tilia cordata*, urban ecosystem, industrial pollution, index of stress.