



Т. Г. Бойко<sup>1</sup>, М. М. Паславський<sup>2</sup>, М. В. Руда<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

<sup>2</sup> Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна

## СТІЙКІСТЬ СКЛАДНИХ ЛАНДШАФТНИХ КОМПЛЕКСІВ: ФОРМАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ

Визначено поняття "стійкості" для складного ландшафтного комплексу. Описано логічною послідовністю процес розвитку небезпеки у складному ландшафтному комплексі. Розроблено систему критеріїв, в основі якої, є зведення в чотири впорядкованих групи великої кількості антропогенних впливів на біоту. Антропогенні впливи поділяють відповідно з чотирма рівнями порушень біоти. Більшість традиційних токсичних ефектів (збільшення смертності, порушення онтогенезу та патології органів і т.ін.) потрапляє в групу, відповідну до рівня індивідуальних і популяційних відгуків (рівень 1). Ще одна група порушень та змін таких параметрів, як зміна первинної продуктивності; зміна агрегованих показників біомаси; зміна концентрації хлорофілу у лісовій екосистемі, інші системні порушення пов'язані з накопиченням важких металів та радіонуклідів (рівень 2). Дуже важливі і поки недостатньо охарактеризовані порушення відносяться до рівня стійкості та цілісності екосистем (рівень 3). Завершує цю систему група порушень вкладу екосистем в біосферні процеси (рівень 4), зокрема і в біогеохімічні потоки елементів. Розроблений підхід корисний під час розроблення максимально адекватної системи критеріїв і пріоритетів для оцінки і класифікації екологічної небезпеки антропогенних впливів зокрема екологічної небезпеки забруднювальних речовин. У запропонованій системі аналізу екологічної небезпеки належне місце займає небезпека впливу на стійкість і цілісність екосистеми, прикладом якої може слугувати небезпека ослаблення зв'язку між біотичними компонентами складного ландшафтного комплексу та абіотичними чинниками навколишнього середовища. Наведено опис лісової екосистеми враховуючи концепцію рівнеблокового підходу до аналізу екологічних небезпек антропогенного порушення біоти.

**Ключові слова:** стійкість; ландшафтний комплекс; модель; компартмент; множина; система.

**Вступ.** Унаслідок взаємодії природних компонентів і антропогенних чинників формується специфічна система складних ландшафтних комплексів (СЛК) різноманітного таксономічного рангу. Цій системі характерні структурно-функціональна єдність взаємозв'язаних компонентів і цілісність біотичної та абіотичної складових. Біотична складова навколишнього середовища об'єднується у компартменти, що складаються з ієрархічно пов'язаних між собою підсистем різних рівнів організації і великої кількості різноманітних ярусів, між якими існують тісні матеріально-енергетичні та ієрархічні зв'язки.

Серед різноманіття антропогенних впливів на СЛК (Flerov, 1989; Bezel, Bolshakov & Vorobejnik, 1994; Yablokov & Ostroumov, 1991) виділяють найважливіші показники та критерії, які характеризують негативний вплив антропогенних чинників (Krivoluckij, 1994) і хімічних речовин (Ostroumov, 1986; Filenko, 1988; Malahov & Medvedeva, 1991). Критерії для визначення екологічної небезпеки речовин розроблялися в площині оцінки токсичного забруднення екосистем (Li et al., 2008). Для моделювання складних багатокомпонентних

(багатовидових) екологічних систем потрібно створити модель стійкості. Математичну модель стійкості СЛК можна визначити як будь-яке спрощене відображення об'єкта (реального чи уявного). З огляду на масштаб досліджуваного СЛК такий підхід видається особливо актуальним. Проте для адекватного його використання необхідно чітко ранжувати небезпеки, що впливають на екологічні процеси в СЛК та розглядати той набір властивостей, що достатньо характеризує систему з точки зору поставленої мети дослідження.

**Мета роботи** – визначити модель стійкості для складних ландшафтних комплексів шляхом формалізації моделі компартмента досліджуваної системи.

**Формалізація моделі.** Компартмент СЛК  $F$  можна подати як множину підмножин характеристик і записати у вигляді (рисунок).

$$F_{ji} = (G_i, T_j, S_p, I), \quad (1)$$

де:  $G$  – підмножина гіротопів  $G = \{G_i | i = 1, 5\}$ ;  $T$  – підмножина трофотопів  $T = \{T_j | j = 1, 5\}$ ;  $S_p$  – множина видової різноманітності компартмента;  $I$  – множина інтегральних характеристик, до яких можна віднести стій-

### Інформація про авторів:

**Бойко Тарас Георгійович**, д-р техн. наук, професор, кафедра приладів точної механіки. Email: [tgbo@ukr.net](mailto:tgbo@ukr.net);

<https://orcid.org/0000-0002-0487-3293>

**Паславський Михайло Михайлович**, пров. інженер, кафедра екології. Email: [mykhaylo.paslavskiy@gmail.com](mailto:mykhaylo.paslavskiy@gmail.com);

<https://orcid.org/0000-0003-1635-4340>

**Руда Марія Віталіївна**, канд. техн. наук, асистент, кафедра екологічної безпеки та природоохоронної діяльності.

Email: [marichkarmv@gmail.com](mailto:marichkarmv@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0003-0590-4589>

**Цитування за ДСТУ:** Бойко Т. Г., Паславський М. М., Руда М. В. Стійкість складних ландшафтних комплексів: формалізація моделі. Науковий вісник НЛТУ України. 2019, т. 29, № 3. С. 108–113.

**Citation APA:** Wojko, T. G., Paslavskiy, M. M., & Ruda, M. V. (2019). Stability of composite landscape complexes: model formalization. *Scientific Bulletin of UNFU*, 29(3), 108–113. <https://doi.org/10.15421/40290323>

кість СЛК. Остання множина характеристик також може включати зв'язки між компонентами екосистеми (Telitchenko & Ostroumov, 1990; Ruda, Paslavskiy & Taras, 2018).

Множина  $G$  містить 5 елементів, або інакше кажучи, лісові типологи (Obshta et al., 2018). Виділяють 5 видів гігروتопів: сухий, свіжий, вологий, сирий, мокрий. З кожним елементом пов'язують параметр  $W$ , який визначає середньорічну глибину рівня ґрунтових вод (у метрах).

Під час дослідження певної системи потрібно локалізувати місцевість, де проводяться дослідження, та ретельно стежити за основними параметрами. Множина  $T$  містить 4 елементи – різновиди фототопів: бір, суббір, суфудок (судіброва), фуд (діброва), які характеризуються агрофізичними та агрохімічними параметрами. До таких властивостей передусім відносять множину ґрунтових характеристик  $S$ :

$$S = \{Sp, St, TD\}, \quad (2)$$

де:  $Sp$  – агрофізичні властивості;  $St$  – тип ґрунту;  $TD$  – лісова підстилка, виділена в окремий шар, оскільки розміщена на поверхні ґрунту.

Агрофізичні властивості характеризують ґрунт з точки зору фізичних особливостей твердої речовини. Тому множину характеристик можна записати у такому вигляді:

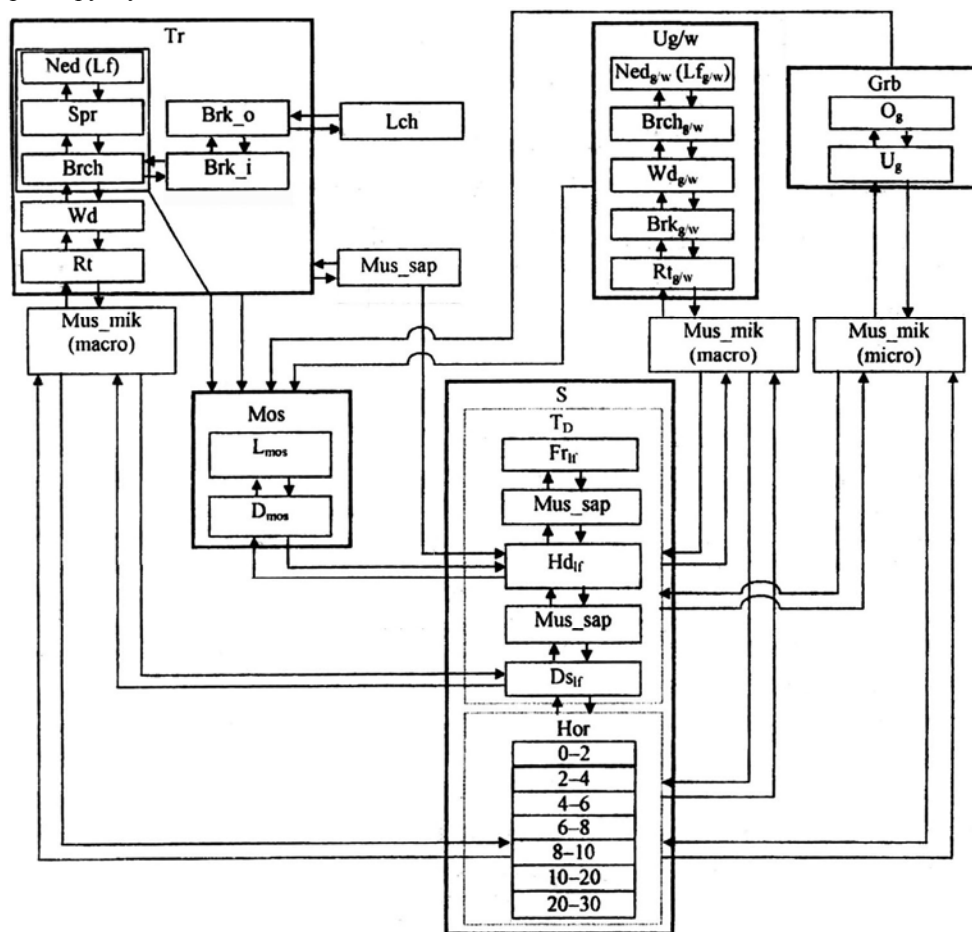
$$Sp = \{Vm, Lm, Prs\}, \quad (3)$$

де:  $Vm$  – об'ємна вага ґрунту ( $\text{г}/\text{см}^3$ );  $Lm$  – питома вага ґрунту ( $\text{г}/\text{см}^3$ );  $Prs$  – загальна шпаруватість (%).

Множина типів ґрунтів ( $St$ ) містить в собі підмножини генетичних горизонтів ґрунтів ( $Hor$ ) механічного складу ґрунту ( $Mch$ ), агрохімічні властивості ґрунту ( $Ch$ ):

$$St = \{Hor, Mch, Ch\}. \quad (4)$$

У межах формування формалізованих описів генетичних горизонтів, прийнято позначати горизонти відповідними символами: основними (великі літери) та допоміжними (малі). Генетичні горизонти  $Hor$  є горизонтальними шарами, що якісно відрізняються один від одного. Перехідні зони позначаються назвами двох суміжних горизонтів.



**Рисунок.** Концептуальна схема формалізованої моделі компартменту СЛК та зв'язків, що в ньому виникають

У ґрунтах СЛК прийнято виділяти такі елементи множини горизонтів (Obshta et al., 2018):

$$Hor = \{B_{hor}, A_{hor}, Ad\}, \quad (5)$$

де:  $B_{hor}$  – основні горизонти;  $A_{hor}$  – додаткові горизонти;  $Ad$  – додаткові, відносно відокремлені, морфологічні елементи ґрунту.

$$B_{hor} = \{T, Ho, H, E, I, P\}, \quad (6)$$

де:  $T$  – торф'яні, що складаються з рослинних решток з різним ступенем розкладу;  $Ho$  – органічні акумулятивні, лісова підстилка;  $H$  – гумусові горизонти, які акуму-

люють органічні речовини;  $E$  – елювіальні, збіднені внаслідок вимивання;  $I$  – ілювіальні, збагачені глинистими частинками внаслідок вимивання;  $P$  – материнська порода.

$$A_{hor} = \{TH, TC, Hd, Pf, R, Rg, Sl, Gl, M, D\}, \quad (7)$$

де:  $TH$  – торф'яно-перегнійні, що складаються із сильно розкладених рослинних решток;  $TC$  – торф'яно-мінералізовані, що складаються переважно з напіврозкладених рослинних решток;  $Hd$  – дернові, що містять дернину;  $Pf$  – псевдофіброві, що складаються з бурих або

червонувато-бурих прошарків, що чергуються з прошарками піску;  $R$  – ортзандові, що складаються з піску, зцементованого окислами заліза;  $Rg$  – ортштейнові, збагачені глиною, гелями кремнію;  $Sl$  – солонцеві, пептизована ґрунтова маса, збагачена рухомою глиною;  $Gl$  – глеєві, мінеральні або органо-мінеральні горизонти, що утворились у відновному середовищі;  $M$  – мергелісті, що складаються з карбонатних новоутворень гідрогенного походження;  $D$  – порода, що залягає глибше, ніж материнська;

$$Ad = \{k, s, r, n, kn, q, qk, f, z, dn, dl, de, al, a, ag, pl, mo, m\}, (8)$$

де:  $k$  – наявність карбонатів;  $s$  – наявність легкорозчинних солей;  $r$  – наявність м'яких залізо-марганцевих стяжок;  $n$  – наявність твердих залізо-марганцевих стяжок;  $kn$  – наявність карбонатних конкрецій;  $q$  – наявність уламків твердих безкарбонатних порід;  $qk$  – наявність уламків твердих карбонатних порід;  $f$  – охри;  $z$  – наявність копролитів, кротовин;  $dn$  – горизонти, що зазнали ерозії;  $dl$  – делювіальні наносні горизонти на поверхні ґрунту;  $de$  – еолові наносні горизонти на поверхні ґрунту;  $al$  – алювіальні наносні горизонти на поверхні ґрунту;  $a$  – орні горизонти;  $ag$  – насипні (рекультивовані) горизонти;  $pl$  – плантажовані горизонти;  $to$  – ознаки зрошення;  $m$  – ознаки осушення.

Отже, якщо для визначення горизонту потрібно вказати його морфологічні особливості, то до визначення основного горизонту додається визначення морфологічних особливостей. Елементи підмножини  $Mch$  умовно поділяють на такі класи: піски (зв'язні, супіски), суглинки (важкі, середні, легкі), глини (важкі, середні, легкі). Ці види механічного складу характеризуються гранулометричним складом:

$$Gr = \{Ul, Cly, Si\}, (9)$$

де, за фракціями:  $Si$  (пісок) = {1-0,5; 0,5-0,25; 0,25-0,05}, мм;  $Cly$  (глина) = {0,05-0,01; 0,01-0,005; 0,005-0,001}, мм;  $Ul$  (мул) = {<0,001}, мм.

Особливо важливими характеристиками ґрунту з погляду моделювання є множина агрохімічних характеристик:

$$Ch = \{De, pH_{H_2O}, pH_{KCl}, C_{орг}, Hum, Ad, Ca, Mg, Ca+Mg, K, P, Na, H_2, Cp, S\}, (10)$$

де:  $De$  – глибина відбору зразків (см);  $pH_{H_2O}$  – рН водний;  $pH_{KCl}$  – рН сольовий;  $C_{орг}$  – вміст органічної речовини (%); Нит – вміст гумусу (%);  $Ad$  – поглинальна здатність ґрунту (мг-екв/100 г); вміст  $Ca$ ,  $Ca+Mg$ ,  $P$ ,  $K$ ,  $Na$  (мг-екв/100 г);  $H_2$  – гідрологічна кислотність (мг-екв/100 г фунту);  $Cp$  – ємність поглинання основ (мг-екв/100 г фунту);  $S$  – ступінь насиченості основами (%).

У лісовій підстилці  $TD$  виділяють свіжий опад  $Fr1f$  – напіврозкладену  $Hdlf$  та розкладену лісову підстилку  $Dslf$ . З лісовою підстилкою пов'язують параметри, які характеризують кількість органічної речовини  $C$  (%), та гумусу Нит (%).

При переході до формалізації описів видових характеристик лісової екосистеми зазначимо, що множину рослинності доцільно умовно поділити за ярусами  $Spf$ . Такий поділ зумовлений передусім тим, що під час моделювання міграції радіонуклідів, полютантів та седиментів доцільно виділяти міграцію не тільки між окремими складовими екосистеми, а і потоки біомас та переходу радіонуклідів, полютантів та седиментів між ярусами лісу.

$$Spf = \{Tr, Ug, Uw, Grb, Fal, Mos, Mush, Lch\}, (11)$$

де:  $Tr$  – множина видів дерев;  $Ug$  – множина видів підліску;  $Uw$  – множина видів підросту;  $Grb$  – множина видів трав'яно-чагарничкового ярусу;  $Fal$  – опад/відпад: множина відмерлих частинок органічної речовини з різних ярусів;  $Mos$  – множина видів мохового ярусу,  $Mush$  – множина видів грибів,  $Lch$  – множина видів лишайників.

Множину видів, що містяться в екосистемі цього виду, можна визначити двома способами: перерахуванням видів, що населяють цю територію; перетином множин ареалів видів з сусідніх едатопів.

Опис ярусу деревиною можна задати так:

$$Tr = \{Wd, Brk, Spr, Ned, Lf, Drch, Rt\}, (12)$$

де:  $Wd$  – стовбур;  $Brk$  – кора;  $Spr$  – пагони;  $Ned$  – шпильки;  $Lf$  – листя;  $Drch$  – гілки;  $Rt$  – коріння.

З ярусом  $Wd$  пов'язані такі змінні, як: маса  $mtr$ , висота  $htr$ , середній діаметр –  $datr$ , вік –  $atr$ , зімкнутість –  $edtr$ , кількість дерев на одиницю площі –  $cntr$ .

$$Wd = \{mtr, htr, datr, atr, edtr, cntr\}. (13)$$

Кору  $Brk$  розрізняють зовнішню  $Brk_o$  та внутрішню  $Brk_i$  і пов'язують її кількісно з масою окремих складових  $mBrk_i$ , та загальною масою  $mBrk$ . Пагони  $Spr$  розрізняють однорічні  $Spr_o$  та старші  $Spr_i$ . Маса визначають як окремо  $mSpr_o$  та  $mSpr_i$ , так і загалом  $mSpr$ . Шпильки  $Ned$  аналогічно, як і пагони, розрізняють однорічні  $Ned_o$  та старші  $Ned_i$ . Маса визначають як окремо  $mNed_o$  та  $mNed_i$ , так і загалом  $mNed$ . Листя  $Lf$  є однорічним, і з точки зору математичного моделювання важливою характеристикою для нього є маса  $mLf$ . Для відокремлення товстих гілок від тонких введено параметр діаметра гілок  $dbc$ . Вважатимемо, що гілки  $Brch$  завтовшки до 5 мм є тонкими, а якщо більше – товстими. Кількісною характеристикою для цього компартмента є маса товстих  $mbw$ , тонких  $mbt$  та загальна маса гілок  $mb$ . Подібно до опису гілок, для коріння  $Rt$  також встановлено межу, яка дає можливість розрізнити тонке та товсте коріння. Отже, за діаметра  $dr$ , меншого, ніж 2 мм, вважають коріння тонким, більшого ніж 2 мм – товстим. З точки зору математичного моделювання також необхідне задавання маси коріння як загалом  $mr$ , так і окремо для товстого та тонкого коріння  $mrt$  та  $mrw$  відповідно.

Для підросту та підліску формалізовані записи будуть подібними, за винятком того, що для цих ярусів не визначають кількість видових одиниць на одиницю площі. Тоді для підросту:

$$Ug = \{Wdg, Brkg, Sprg, Nedg, Lfg, Brchg, Rtg\}; (15)$$

$$Wdg = \{mg, hg, dg, ag, cdg\}, (16)$$

а для підліску:

$$Uw = \{Wdw, Brkw, Sprw, Nedw, Lfw, Brchw, Rtw\}; (17)$$

$$Wdw = \{mw, hw, dw, aw, cdw\}. (18)$$

У решті описів різниці між цими ярусами не зазначають.

Окремим компартментом виділяють опад та відпад, який описується фракційним складом  $P_2$ , оскільки потрапляє на поверхню фунту з різних ярусів.

$$Fr = \{Brchf, Lff, Nedf, Budf\}, (19)$$

де  $Brchf$  – опалі бруньки. Опад та відпад пов'язують з однією змінною – біомасою  $mf$  (кг/га). Такий детальний поділ на компартменти та зважування компартментів окремо дає змогу в подальшому не тільки оцінити дина-

міку зміни біомаси, а й оцінити ступінь важливості цієї складової.

Для шару трав'яно-чагарничкових рослин *Grb* виділяють надземну *Og* та підземну *Ug* фітомасу, визначаючи їх маси *mog* та *mug* відповідно; глибину проникнення кореневої системи у ґрунт *dhr*. Для надземної фітомаси визначають також проективне покриття *cd* сумарне та для окремих видів, що входять до ярусу. Для підземної визначають глибину проникнення коріння *drot*.

Моховий ярус *Mos* під час математичного моделювання вважають компартментом, в якому виділяють живу  $L_{mos}$  та мертву  $D_{mos}$  частини:

$$Mos = \{L_{mos}, D_{mos}\}. \quad (20)$$

Для кожної з частин визначають її масу  $m_{mos}$  та проективне покриття *spr*:

$$L_{mos} = \{m_{mos}, spr\}; \quad (21)$$

$$D_{mos} = \{m_{mos}, spr\}. \quad (22)$$

Параметри  $m_{mos}$ , *spr* пов'язані між собою, але з точки зору побудови математичної моделі вони характеризують моховий ярус з різних боків.

Серед грибів *Mus* виділяють мікоризоутворювачі, сапротрофи (гумусові та підстилкові), ксилотрофи (паразитні та сапротрофи). Серед мікоризних грибів розрізняють макроміцети та мікроміцети. Останні характерні для трав'яно-чагарничкового ярусу. Кількісною характеристикою, що описує ці види грибів, є маса висушеного плодового тіла  $m_{body}$ . Загальна маса міцелію  $m_{mus}$  визначається методом зважування висушених плодівих тіл грибів з одиниці площі та множення на відповідний коефіцієнт *km*. Цей коефіцієнт є визначеним тільки для мікоризоутворювачів ( $km = 1:154$  кг/га)

та сапротрофів ( $km = 1:62,6$  кг/га), (Pogrebnyak, 1955). Ці коефіцієнти дають змогу визначити загальну масу міцелію *za* масою висушених плодівих тіл. Загальна маса  $m_{mus} = m_{myc} + m_{body}$  є сумою міцелію та маси плодівих тіл  $m_{myc} = m_{body} \cdot km$ . Також важливо знати глибину проникнення міцелію в ґрунт  $d_{myc}$ . Серед лишайників *Lch* виділяють епігейні (що ростуть на ґрунті) та епіфітні (що ростуть на деревах). Епігейні лишайники не характерні для досліджуваного СЛК. Кількісною характеристикою, що описує ці два типи, є відношення біомаси до одиниці площі, на якій мешкають лишайники (кг/м<sup>2</sup> ґрунту).

**Небезпеки для складних ландшафтних комплексів.** Власне процес розвитку небезпеки можна описати такою логічною послідовністю: порушення екологічної стійкості → накопичення чинників, що призводять до відмов біологічних систем → реакція ярусів і/та підсистем компартментів на дію антропогенних чинників → синергія дії чинника → реакція на вражаючу дію.

У роботах (Zejliger & Tamari, 1995; Jablokov & Ostroumov, 1983) класифікацію антропогенних впливів на живу природу здійснено на основі концепції рівнів організації живої матерії. Розвиваючи цей підхід на основі ієрархічної структури СЛК, пропонуємо систему, яка впорядковує розмаїття ефектів, пов'язаних з антропогенним впливом на СЛК (таблиця).

Особливістю системи критеріїв, викладеної в таблиці, є зведення в чотири впорядкованих групи великої кількості антропогенних впливів на біоту. Антропогенні впливи поділяють відповідно до чотирьох рівнів порушень біоти.

**Таблиця. Концепція рівнеблокового підходу до аналізу екологічних небезпек антропогенного порушення біоти**

№ з/п	Рівень порушення	Приклади порушень і їх наслідків (деякі з них можуть належати до декількох рівнів)
1	Рівень індивідуальних і популяційних відгуків	– токсичні ефекти на окремі види організмів (збільшення смертності, зниження плодючості, порушення онтогенезу, патології та ін.)
2	Рівень агрегованих (надорганізмові) відгуків	– зміна первинної продуктивності; зміна агрегованих показників біомаси; – зміна концентрації хлорофілу у лісовій екосистемі; – інші системні порушення, пов'язані з накопиченням важких металів та радіонуклідів
3	Рівень стійкості СЛК	– перебудови і/або ослаблення зв'язків між ґрунтом → моховим ярусом → деревостаном → підростом, підліском, трав'яно-чагарниковим ярусом; – перебудови і/або ослаблення зв'язків у трофічній мережі; – зміна біогеохімічних циклів; – слабка здатність до саморегуляції та самовідновлення; – рівня бактеріальної деструкції зниження освітлення/вилучення часток з води зниження самоочищення води; – зниження регуляторних впливів під час випадання, догляду або трофічної пасивності організмів вищих трофічних рівнів
4	Рівень вкладу СЛК в біосферні процеси	– зміна потоків (наприклад, седиментація поллютантів), потоків <i>N</i> (наприклад, зміна рівня азотфіксації), потоків та циклів інших елементів, у тому числі <i>S</i> і <i>P</i> ; – зміна потоків енергії (теплової та ін.)

Більшість традиційних токсичних ефектів (збільшення смертності, порушення онтогенезу та патології органів і т.ін.) потрапляє в групу, відповідну до рівня індивідуальних і популяційних відгуків (рівень 1). Ще одна група порушень та змін таких параметрів, як зміна первинної продуктивності; зміна агрегованих показників біомаси; зміна концентрації хлорофілу у лісовій екосистемі, інші системні порушення пов'язані з накопиченням важких металів та радіонуклідів (рівень 2). Дуже важливі і поки недостатньо охарактеризовані порушення, відносять до рівня стійкості та цілісності екосистем (рівень 3). Завершує цю систему група порушень вкладу екосистем у біосферні процеси (рівень 4), зокрема і в біогеохімічні потоки елементів.

Подібний підхід узгоджується з роботами інших авторів (Jablokov & Ostroumov, 1985; Stroganov, 1976) і корисний під час розроблення максимально адекватної системи критеріїв і пріоритетів для оцінки і класифікації екологічної небезпеки антропогенних впливів, зокрема й екологічної небезпеки забруднювальних речовин. У запропонованій системі аналізу екологічної небезпеки належне місце займає небезпека впливу на стійкість і цілісність екосистеми, прикладом якої може слугувати небезпека ослаблення зв'язку між біотичними компонентами СЛК та абіотичними чинниками навколишнього середовища. Якщо антропогенний вплив послаблює цей зв'язок в екосистемі, то наслідки є несприятливими (Filenko, 1988). Отже, до опису складових СЛК мають бути введені змінні та параметри, що ха-

рактизують активність забруднювача в кожній складовій та щільність забруднення окремих складових.

**Результати дослідження та їх обговорення.** Отже, у загальному вигляді, опис лісової екосистеми, враховуючи концепцію рівнеблокового підходу до аналізу екологічних небезпек антропогенного порушення біоти –  $F$ , можна подати у такому вигляді:

$$F_{ji} = \{G_i, T_j, S_p, I, Amf, Asf\}, \quad (23)$$

де:  $Asf$  – щільність забруднення ґрунту СЛК (Бк/м<sup>2</sup>);  $Amf$  – питома активність біомаси (Бк/кг).

Зважаючи на те, що трофотопи  $T_j$  характеризуються множиною підмножин ґрунтових характеристик  $S = \{Sp, St, TD\}$ , доцільно детальніше описати входження змінних, що характеризують активність забруднювачів, до множин характеристик ґрунту. Тоді формалізований опис агрофізичних властивостей  $Sp$  ґрунту набуде вигляду

$$Sp = \{Vm, Lm, Prs, Aml\}, \quad (24)$$

де  $Aml$  – питома активність, отримана переважно внаслідок лессіважу (Бк/кг). Для множини типів ґрунтів  $St$  можна навести такий опис:

$$St = \{Hor, Mch, Ch, Amst, Asst\}, \quad (25)$$

де:  $Amst$  – питома активність певного горизонту ґрунту (Бк/кг),  $Asst$  – щільність забруднення певного горизонту ґрунту (Бк/м<sup>2</sup>).

Зазначимо, що генетичні горизонти  $Hor$  відіграють провідну роль у міграції <sup>137</sup>Cs. Гумусний горизонт є геохімічним бар'єром на шляху переходу радіонуклідів вглиб ґрунту. Механічний склад ґрунту  $Mch$  впливає на мобільність радіонуклідів: наявність глинистих фракцій  $Clu$  сприяє міцній фіксації радіоцезію, але висока частка піщаної складової  $Si$ , навпаки, сприяє його міграції. Хімічні властивості ґрунту  $Ch$  істотно впливають на вертикальну та горизонтальну міграцію радіонуклідів у ґрунті. Кислі реакції, що відбуваються у ґрунті, сприяють збільшенню рухливості радіонуклідів та їх більшому надходженню у рослини.

Лісову підстилку  $TD$  більшість дослідників також вважає геохімічним бар'єром для <sup>137</sup>Cs, що потрапляє на її поверхню. Тому за середньої потужності 4–5 см підстилка із шпильок сосни, яка розкладається впродовж 6–8 років, здатна тривалий час утримувати радіонукліди у своїй товщі. Величиною, що характеризує накопичення підстилкою радіонуклідів, є  $AmTD$  – питома активність (Бк/кг) як для всієї підстилки, так і за фракціями: свіжого опаду  $AmTlf$  напіврозкладеної  $Amdlf$  та розкладеної лісової підстилки  $Amslf$ .

Подібно до опису фітоценозу, що наведено вище, в проведених дослідженнях також всю множину видів фітоценозу можливо умовно поділити за ярусами і визначити питому активність ярусів  $AmSpF$  для визначення міграції шкідливих речовин у межах ярусу та між ними:  $Spf = \{Tr, Ug, Uw, Grb, Fal, Mos, Mush, Lch, AmSpf\}$ . (26)

Опис ярусу деревостану можна задати так:

$$Tr = \{Wd, Brk, Spr, Ned, Lf, Brch, Rt, Am_spf\}, \quad (27)$$

де  $Am_spf$  – питома активність окремого виду дерева (Бк/кг). Так, для кожної фракції вводять питому активність, яка характеризує накопичення в ній, наприклад радіоцезію. Для компартмента  $Wd$ :

$$Wd = \{mtr, htr, datr, atr, edtr, cntr, Amwd\}, \quad (28)$$

де  $Amwd$  – питома активність фракції деревини (Бк/кг).

Для підросту та підліску формалізовані записи будуть такими:

$$Ug = \{Wdg, Brkg, Sprg, Nedg, Lfg, Brchg, Rtg, Am_spg\}, \quad (29)$$

$$Wdg = \{mg, hg, dg, ag, cdg, Amg\}, \quad (30)$$

$$Uw = \{Wdw, Brkw, Sprw, Nedw, Lfw, Brchw, Rtw, Am_spw\}, \quad (31)$$

$$Wdw = \{mw, hw, dw, aw, cdw, Amwd\}, \quad (32)$$

де:  $Am_spg$  – питома активність окремого виду підросту (Бк/кг);  $Amg$  – питома активність фракції стовбуру підросту (Бк/кг);  $Am_spw$  – питома активність окремого виду підліску (Бк/кг);  $Amwd$  – питома активність стовбуру підліску (Бк/кг).

У решті описів різниці між цими ярусами можна не зазначати. Накопичення поллютантів та седиментів для кожної фракції розраховують аналогічно. Для опаду та відпаду визначають питому активність фракцій окремо  $Am_lfi$ , що дає змогу кількісно оцінити динаміку переходу радіонуклідів, поллютантів та седиментів з одного компартмента в інший. Для ярусу трав'яно-чагарничкових рослин  $Grb$  вимірюють питому активність надземної  $AmOg$  та підземної  $AmUg$  фітомаси. Середньозважені ці показники для всього ярусу, або для кожного конкретного виду. Оскільки моховий ярус  $Mos$  під час математичного моделювання вважають компартментом, в якому виділяється жива  $L_{mos}$  та мертва  $D_{mos}$  частини, то визначається окремо питома активність кожної частини  $AmLm$ , та  $AmDm$  середньозважені ці показників для всього ярусу або для кожного конкретного виду. Для грибів  $Mus$  вважають, що питома активність плодових тіл  $Am_{body}$  дорівнює питомій активності міцелію  $At_{тис}$  (Ostroumov, Donkin & Staff, 1997; Kaurichev et al., 1982). Для лишайників  $Lch$  також визначають питому активність  $Amlch$ , яка характеризує вміст радіонукліду в цьому компартменті лісової екосистеми.

**Висновки.** Система критеріїв, наведена в таблиці, спрощує і впорядковує аналіз екологічної ролі та наслідків порушення конкретної фізіологічної функції. Переходячи в запропонованій системі від рівня до рівня, зручно простежувати масштабування екологічних наслідків порушення, на рівні особин, але здатного проявити себе в екологічно небезпечній формі на інших рівнях організації СЛК.

## Перелік використаних джерел

- Bezel, B. C., Bolshakov, V. N., & Vorobejnik, E. L. (1994). *Populjacionnaja jekotoksikologija*. Moscow: Nauka, 81 p. [In Russian].
- Fileiko, O. F. (1988). *Vodnaja toksikologija*. Chernogolovka: Publishing MGU, 156 p. [In Russian].
- Fileiko, O. F. (1988). *Vodnaja toksikologija*. Chernogolovka: Publishing MGU, 156 p. [In Russian].
- Flerov, B. A. (1989). *Jekologo-fziologicheskie aspekty toksikologii presnovodnyh zhivotnyh*. Leningrad: Nauka, 144 p. [In Russian].
- Jablokov, A. V., & Ostroumov, S. A. (1983). *Ohrana prirody: problemy i perspektivy*. Moscow: Lespromizdat, 272 p. [In Russian].
- Jablokov, A. V., & Ostroumov, S. A. (1985). *Urovni ohrany zhivoj prirody*. Moscow: Science, 176 p. [In Russian].
- Kaurichev, I. S., Aleksandrova, L. N., Panov, N. P., et al. (1982). *Pochvovedenie*. Moscow: Kolos, 496 p. [In Russian].
- Krivoluckij, D. A. (1994). *Pochvennaja fauna v jekotoksiko-logicheskom kontrole*. Moscow: Nauka, 272 p. [In Russian].
- Li, B.-L., Gorshkov, V. G., Makarieva, A. M., & Petrosillo, I., et al. (Eds). (2008). Allometric scaling as an indicator of ecosystem state: a new approach. *Use of Landscape Sciences for the Assessment of Environmental Security*, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, Springer, the Netherlands, 107–117.

- Malahov, V. V., & Medvedeva, L. A. (1991). *Jembrional'noe razvitie dvustvorchatyh molluskov v norme i pri vozdeystvii tzhzhelyh metallov*. Moscow: Science, 132 p. [In Russian].
- Obshta, A., Bubela, T., Ruda, M., & Kochan, R. (2018). The model of environmental assessment of complex landscape systems. *Renewable energy sources and clean technologies: Proceedings 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference*, July 2–8, 2018, (pp. 973–979). Albená, Bulgaria.
- Ostroumov, S. A. (1986). *Vvedenie v biohimicheskuyu jekologiju*. Moscow: Publishing MGU, 176 p. [In Russian].
- Ostroumov, S. A., Donkin, P., & Staff, F. (1997). MGU. Ser. 16. *Biologija*, 3, 30–36. [In Russian].
- Pogrebnjak, P. S. (1955). *Osnovy lesnoj tipologii*. Kyiv: Publishing AN USSR, 456 p. [In Russian].
- Ruda, M., Paslavskiy, M., & Taras, Y. (2018). *Scientific development and achievements*. London: SCIEEMCEE Publishing London, 402 p.
- Stroganov, N. S. (1976). Obshhaja jekologija. Biocnologija. Hidrobiologija. *Vodnaja jekologija*. (Vol. 3, pp. 5–47). Moscow: VINITI. [In Russian].
- Telitchenko, M. M., & Ostroumov, S. A. (1990). *Vvedenie v problemy biohimicheskoy jekologii*. Moscow: Science, 288 p. [In Russian].
- Yablokov, A., V., & Ostroumov, S. A. (1991). *Conservation of Living Nature and Resources: Problems, Trends and Prospects*. B.: Springer, 272 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-75376-3>
- Zejliger, A. M., & Tamari, S. (1995). Sposoby formal'nogo predstavlenija gidrofizicheskikh harakteristik vodouderzhivaniya i vlagoprovodnosti pochvy. *Pochvovedenie*, 2, 192–199. [In Russian].

**T. Gh. Bojko<sup>1</sup>, M. M. Paslavskiy<sup>2</sup>, M. V. Ruda<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

<sup>2</sup> Ukrainian National Forestry University, Lviv, Ukraine

## STABILITY OF COMPOSITE LANDSCAPE COMPLEXES: MODEL FORMALIZATION

The concept of "sustainability" for the composite landscape complex is defined in the paper. The logical sequence of the risk development process in a landscape complex is described. A system of criteria has been developed based on the subdivision of a large number of anthropogenic impacts on biota into four orderly groups. Anthropogenic impacts are categorised according to four levels of impaired biota. Most of the traditional toxic effects (increased mortality, disorders of ontogenesis and pathology of the organs, etc.) belong to the group corresponding to the level of individual and population responses (level 1). Another group of disorders and change parameters contains the following: change in primary productivity, change in aggregate indicators of biomass, change in the concentration of chlorophyll in the forest ecosystem, and other systemic disorders associated with accumulation of heavy metals and radionuclides (level 2). Very important yet under-described violations relate to the level of sustainability and integrity of ecosystems (level 3). The group of violations of the contribution of ecosystems to biosphere processes (level 4) including biogeochemical flows of elements completes this system. The approach presented is useful in the development of the most adequate system of criteria and priorities to assess and classify ecological risk of anthropogenic impacts including ecological danger of pollutants. In the proposed system of environmental hazard analysis, due place occupies a risk of affecting the stability and integrity of ecosystems, an example of which can serve as a risk of weakening of relationships between biotic components of a composite landscape complex and abiotic environmental factors. If an anthropogenic effect weakens this relationship in the ecosystem, the consequences can be unfavourable. Thus, the description of the CLC components should contain input variables and parameters characterizing the activity of the pollutant in each component and the density of contamination of individual components. The description of forest ecosystems considers the concept of runebledges approach to the analysis of ecological hazards of anthropogenic disturbances on biota. The system of criteria simplifies and streamlines the analysis of the ecological role and consequences of violations of specific physiological functions. Turning to the proposed system from level to level, it is convenient to trace the scale of the environmental effects of violations on an individual level, but is able to express themselves in an ecologically hazardous form at other levels of organization of landscapes complex.

**Keywords:** sustainability; landscape complex; model; compartment; multiple; system.