

МОДЕЛЮВАННЯ СТАНІВ СКЛАДНОГО ЛАНДШАФТНОГО КОМПЛЕКСУ ПРИ НЕВІДОМІЙ ФУНКЦІЇ ВТРАТ

Руда М.В.¹, Шибанова А.М.¹, Паславський М.М.², Джумеля Е.А.¹

¹Національний університет «Львівська політехніка»
вул. Степана Бандери, 12, 7900, м. Львів

²Національний лісотехнічний університет України
вул. Генерала Чупринки, 103, 79057, м. Львів

maria.v.ruda@lpnu.ua, alla.m.shybanova@lpnu.ua, elvira.a.dzhumelia@lpnu.ua;
mykhailo.paslavskyi@nltu.edu.com

Встановлено, що ризики виникнення і розвитку аварійних ситуацій на реальних об'єктах безперервно змінюються, зумовлюють значні методичні та інструментальні похибки класифікації (розпізнавання) небезпечних ситуацій і під час ідентифікації передаварійних ситуацій знижують вірогідність і однозначність одержуваної інформації. Велика частина досліджень у розглянутій предметній сфері присвячена вирішенню проблем, пов'язаних з управлінням промисловою і екологічною безпекою об'єктів і оптимізацією систем відшкодування збитку від надзвичайних ситуацій. Моделювання функціональних властивостей складного ландшафтного комплексу пропонується розглядати як процес упорядкування організаційних компартментів у взаємозв'язку і взаємодії для підвищення їхньої надійності, стійкості та захисної ефективності. Запропоновано підхід до вирішення проблем моделювання складного ландшафтного комплексу за спостережуваними даними за відсутності можливості точного визначення відповідних функцій втрат (ризиків), який дозволить підвищити ефективність управління промисловою безпекою. Для визначення компартментів складного ландшафтного комплексу застосовано метод регулярної еквівалентності, адаптований із Соціальної Теорії Мереж. Досліджено неklasичний підхід до вирішення завдання визначення станів технічної та природної сфери у складному ландшафтному комплексі за спостережуваними даними за відсутності можливості точного визначення відповідних функцій втрат (ризиків) для вирішальних правил. Основна відмінність найкращого вирішального правила станів складного ландшафтного комплексу полягає в тому, що розділююча функція визначається довільним видом функцій втрат із точністю до складеного вектора параметрів, що залежать від спостережуваних даних і часткової апріорної інформації про компартменти складного ландшафтного комплексу. Сформульовано оптимальне в сенсі мінімуму розглянутого неklasичного середнього ризику вирішальне правило станів складного ландшафтного комплексу для трьох можливих станів компартментів цього складного ландшафтного комплексу. Встановлено, що запропонований підхід до оцінки стійкості та ризиків втрати компартменту у складного ландшафтного комплексу дає можливість отримати кількісні показники стійкості та ризиків втрати компартменту, що може бути використано як індикатори стану всього складного ландшафтного комплексу. На основі таких показників можливий розрахунок тих порогових величин, поза якими відбуваються негативні явища, прогнозування та моделювання ситуацій, картування джерел ризиків, моніторинг змін, а це дозволить виявити причини цих змін або встановити фактори, що сповільнюють чи стримують наближення складного ландшафтного комплексу до критичного стану, тобто розробити превентивні заходи запобігання катастрофам. *Ключові слова:* складний ландшафтний комплекс, екологічна безпека, стани, функція втрат.

Modeling of states of a compound landscape complex with an unknown loss function. Ruda M., Shybanova A., Paslavskyi M., Dzhumelia E.

It is established that the risks of occurrence and development of emergencies on real objects are constantly changing, cause significant methodological and instrumental errors in the classification (recognition) of dangerous situations and in the identification of pre-emergency situations reduce the reliability and uniqueness of the information obtained. Most of the research in this subject area is devoted to solving problems related to the management of industrial and environmental safety of facilities and optimization of compensation systems for emergencies. Modeling of functional properties of a compound landscape complex is offered to be considered as a process of ordering of compartments in interrelation and interaction for increase of their reliability, stability and protective efficiency. The approach to the decision of issues of modeling of a compound landscape complex on the observed data in the absence of possibility of exact definition of the corresponding functions of losses (risks) which will allow increasing efficiency of management of industrial safety is offered. To determine the compartments of a compound landscape complex, the method of regular equivalence adapted from the Social Theory of Networks was applied. The non-classical approach to the decision of an issue of definition of states of technical and natural sphere in a compound landscape complex on the observed data in the absence of possibility of exact definition of corresponding functions of losses (risks) for decisive rules is investigated. The main difference of the best decisive rule of states of a compound landscape complex is that the separating function is determined by an arbitrary type of loss functions up to a composite vector of parameters depending on the observed data and partial a priori information about the compartments of a compound landscape complex. The optimal in the sense of the minimum of the considered non-classical average risk the decisive rule of states of a compound landscape complex for three possible states of compartments of this compound landscape complex is formulated. It is established that the proposed approach to assessing the resilience and risks of loss of a compartment in a compound landscape complex makes it possible to obtain quantitative indicators of resilience and risks of loss of a compartment, which can be used as indicators of the state of the entire compound landscape complex. Based on such indicators, it is possible to calculate the thresholds beyond which adverse events occur, forecasting and modeling situations, mapping risk sources, monitoring changes, and this will identify the causes of these changes or identify factors that slow or hinder the approach of a compound landscape to a critical state, i.e. to develop preventive measures to prevent disasters. *Key words:* compound landscape complex, ecological safety, states, loss function.

Постановка проблеми. Відомо, що сучасний рівень розвитку методології аналізу системних ризиків базується на розгляді небезпечних об'єктів і технологічних процесів як статичних систем із параметрами, що не змінюються в часі [1]. Однак ризики виникнення і розвитку аварійних ситуацій на реальних об'єктах безперервно змінюються, зумовлюють значні методичні та інструментальні похибки класифікації (розпізнавання) небезпечних ситуацій і під час ідентифікації передаварійних ситуацій знижують вірогідність і однозначність одержуваної інформації.

Актуальність дослідження. Велика частина досліджень у розглянутій предметній сфері присвячена вирішенню проблем, пов'язаних з управлінням промисловою й екологічною безпекою об'єктів і оптимізацією систем відшкодування збитку від надзвичайних ситуацій [2, 3]. При цьому в [4] зазначається, що основними причинами низької ефективності управління промисловою безпекою та низької достовірності одержуваних даних є: недостатня повнота статистичних даних і значна методична похибка екстраполяції вхідних даних, що призводить до низької достовірності оцінки небезпечних ситуацій. Вперше можливість оптимального дуального управління на основі теорії статистичних рішень розглядалися в роботах [5, 6].

Моделювання функціональних властивостей складного ландшафтного комплексу (СЛК) пропонується розглядати як процес упорядкування організаційних компартментів у взаємозв'язку і взаємодії для підвищення їхньої надійності, стійкості та захисної ефективності.

Базуючись на гіпотезі, що СЛК можна представити як сукупність компартментів, які мають властивості цілого СЛК, виділено деяку ділянку СЛК одиничної площі. За умовами усі такі ділянки – еквівалентні. Проведено верхню межу досліджуваної системи паралельно поверхні ґрунту на висоті H , приблизно рівній потроєній висоті дерев h . На деякій глибині R за межами шару розміщення кореневої системи проведено нижню грань. Утворений у такий спосіб паралелепіпед і буде розглянутий як об'єкт моделювання. Через бокові грані обмін енергією і речовиною не відбувається, оскільки відсутні відповідні градієнти. У виділений об'єм через верхню грань проникає сонячна радіація і вуглекислий газ, а видаляються, наприклад, пари води. Так само зазначені обмінні процеси відбуваються через нижню грань. Попри це, все, що надходить у систему, відноситься до її вхідних впливів, а все що з неї видаляється, – або до втрат, або до відчужуваного кінцевого продукту.

Під час математичного моделювання СЛК розглядають їх екологічний вплив як деякий індекс, який приймається однорідним і ізотропним у горизонтальній площині, а площу СЛК – досить великою для того, щоб можна було знехтувати ефектом «краю поля». У цьому разі всі перетоки енергії і речовини

здійснюються тільки у вертикальному напрямі. Понад це, можна також нехтувати ефектом неоднорідності ґрунту, вважаючи, що описувані процеси можуть бути віднесені до будь-якої частини СЛК. Зрозуміло, однорідних і ізотропних СЛК у природі не існує, однак запропонована ідеалізація дає змогу досягнути необхідну коректність математичних побудов. Отже, неоднорідність модельованої системи проявляється при цьому тільки у вертикальному розміщенні цілей, де важливими є процес і результат моделювання, а модель СЛК має охоплювати прогнозування основних змінних СЛК, бути тим засобом, яким управлінці мають надавати необхідного окреслення поведінці компартментів СЛК та впливу на них. До основних організаційних змінних інформаційної системи (ІС) пропонується віднести: складну організаційну структуру (у вигляді дерева цілей, структурних та функціональних схем); динамічну систему показників: надійності, стійкості та захисної ефективності. Все це зумовлює актуальність моделювання СЛК, яке б охоплювало усі рівні організації СЛК у взаємодії із зовнішнім середовищем, насиченим урбаністичними, промисловими та аграрним комплексами. При цьому особливе функціональне значення має специфіка переходу речовинно-енергетичних потоків зі згаданих антропогенних до природних систем і здатність останніх долати ці антропогенні забруднення. А це породжує проблему регулювання стану самого СЛК. Базуючись на сказаному, головне завдання полягає не стільки у скороченні антропогенних забруднювальних викидів, скільки у збереженні ієрархічної структури СЛК та забезпеченні біотичних механізмів регулювання, використання та відтворення СЛК [7]. Для цього необхідне розроблення підходів та методів кількісної оцінки стану СЛК, яка давала би змогу відображати показники їх порушення, стійкості, а відтак створити умови для розрахунку ризиків втрат.

Мета роботи: запропонувати підхід до вирішення проблем моделювання СЛК за спостережуваними даними за відсутності можливості точного визначення відповідних функцій втрат (ризиків), який дозволить підвищити ефективність управління промисловою безпекою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для визначення компартментів (СІ) СЛК застосовано метод регулярної еквівалентності, адаптований із Соціальної Теорії Мереж [8]. Алгоритм регулярної еквівалентності (доступний у програмі *Ucinet 6*) оцінює подібність ролей компартментів в СЛК на основі бінарної матриці $A_{n \times n}$ зв'язків між ними. Ієрархічне кластерування [9] вихідної матриці подібності з аналізу регулярної еквівалентності дозволило виділити окремі яруси і підсистеми в досліджуваних компартментах. Більш детально алгоритм регулярної еквівалентності та методи агрегації мереж представлені в роботах Боргатті та Еверета [10], Лужковіча [11] та інших.

Результати досліджень та їх обговорення. Виходячи з вищеописаних методів, виділено

компартмент СЛК F , який можна подати як множину характеристик і записати у вигляді:

$$F_{ji} = (G_p, T_p, S_p, I), \quad (1)$$

де G – підмножина гіротопів $G = \{G_i | i = 1, 5\}$; T – підмножина трофотопів $T = \{T_j | j = 1, 5\}$; S_p – множина видової різноманітності підсистеми компартменту; I – множина інтегральних характеристик, до яких можна віднести стійкість СЛК. Остання множина характеристик також може містити зв'язки між компонентами екосистеми.

Множина G містить 5 елементів, або, інакше кажучи, лісові типологи [12] виділяють 5 видів гіротопів: 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 необхідно локалізувати місцевість, де проводяться дослідження, та ретельно стежити за основними параметрами, необхідними для досліджень.

Множина T містить 4 елементи – різновиди трофотопів: бір, суббір, суфудок (судіброва), фуд (діброва), які характеризуються агрофізичними та агрохімічними параметрами. До таких властивостей насамперед 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 знаходиться на поверхні ґрунту.

Агрофізичні властивості характеризують ґрунт з огляду на фізичні особливості твердої речовини. Тому множину характеристик можна записати у вигляді:

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

де Vm – об'ємна маса ґрунту ($г/см^3$), Lm – питома маса ґрунту ($г/см^3$), Prs – загальна шпаруватість (%).

Множина типів ґрунтів (St) містить у 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.

У ґрунтах СЛК прийнято виділяти такі елементи множини горизонтів [12]:

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

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 рештків з різним ступенем розкладу; Ho – органічні акумулятивні, лісова підстилка; H – гумусові, горизонти, які акумулюють органічні речовини; E – елювіальні, збіднені в результаті вимивання; I – ілювіальні, збагачені глинистими частинками внаслідок вимивання; P – материнська порода.

Динаміку функціонування більшості СЛК з урахуванням прогнозу їх стану можна представити у вигляді деякого ситуаційного процесу із трьома можливими станами. Перший стан пов'язаний з ситуацією X_1^0 , коли стан СЛК повністю відповідає заданим умовам функціонування і в принципі поява екологічної небезпеки (ЕН) мало ймовірна. Другий стан пов'язаний із ситуацією X_2^0 , коли стан СЛК не відповідає заданим умовам функціонування і може привести до ЕН, але поки не виникає необхідності застосування активних заходів щодо її ліквідації. Третій стан пов'язаний із ситуацією X_3^0 , коли стан СЛК призводить до появи ЕН, що вимагає застосування активних заходів щодо її ліквідації. При цьому кожна зі згаданих ситуацій з'являється випадково.

Позначимо через X простір розглянутих вище ситуацій ЕН в СЛК. Цей простір розіб'ємо на три області X_k , де $k = 1, 2, 3$. Для визначення вирішального правила необхідно сформулювати критерій якості класифікації ЕН та небезпечного об'єкта (НО), тобто розпізнавання ситуацій X_k^0 , $k = 1, 2, 3$. Вирішальне правило повинно бути таким, щоб сформульований критерій досягав екстремуму. Це означає, що завдання класифікації станів СЛК полягає в найкращому, в сенсі заданого критерію, розбитті простору ситуацій X на області X_k , $k = 1, 2, 3$.

Для конкретизації поняття станів СЛК введено матрицю втрат компартменту:

$$F(x, c) = \begin{bmatrix} F_{11}(x, c) & F_{12}(x, c) & F_{13}(x, c) \\ F_{21}(x, c) & F_{22}(x, c) & F_{23}(x, c) \\ F_{31}(x, c) & F_{32}(x, c) & F_{33}(x, c) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де $F_{km}(x, c)$ – функції втрат компартменту для значень $k, m = 1, 2, 3$; c – складова вектора параметрів функцій втрат, що дорівнює $c = [c_1, c_2, c_3]$. Функції втрат $F_{km}(x, c)$, $k, m = 1, 2, 3$ характеризують ризики, пов'язані зі станами СЛК, що виникають при перенесенні ситуації X_k^0 до класу ситуації X_m^0 або при потрапленні ситуації X_k^0 в область X_m .

На головній діагоналі матриці (7) розташовано ризики при нейтральних значеннях НО в СЛК, а по обидва боки від головної діагоналі розташовано ризики (втрати) при негативних значеннях станів НО. Будемо вважати, що $F_{km}(x, c) < 0$ для всіх $k = 1, 2, 3$. Такі негативні ризики можна інтерпретувати як деякі виграші при нормальних станах СЛК та мінімальних ризиках втрати компартменту. При цьому ситуація із простору X для кожного класу X_k^0

характеризується умовною щільністю розподілу $p(x/k) = p_k(x)$ і апріорною ймовірністю P_k . З огляду на це для розглянутого випадку появи ЕН введемо вектор апріорних даних такого вигляду:

$$P(x) = [p_1(x)P_1, p_2(x)P_2, p_3(x)P_3]^T, \quad (8)$$

У такому разі середній ризик втрати компартменту у СЛК в умовах ЕН є функціонал меж Λ_{km} між областями X_k і X_m для всіх $k, m = 1, 2, 3$ і складеного вектора c . Для фіксованого складеного вектора c стан СЛК з появою ЕН буде визначатися за межею Λ_{km} .

З метою можливості пошуку оптимальних у сенсі мінімуму середнього ризику виникнення ЕН об'єкту в СЛК меж і складеного вектора скористаємося вектором характеристичних функцій рішень виду:

$$\Theta(x, c) = [\Theta_1(x, c)\Theta_2(x, c)\Theta_3(x, c)]^T. \quad (9)$$

У векторі (9) характеристика функції:

$$\Theta_m(x, c) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } X \in X_m \\ 0, & \text{якщо } X \notin X_m, \quad m = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (10)$$

З урахуванням (7) – (9) величину середнього ризику стану СЛК з ЕН об'єктом можна представити у векторно-матричній формі:

$$R(c) = \int_x \Theta^T(x, c) F^T(x, c) P(x) dx. \quad (11)$$

Тоді умова мінімуму середнього ризику (11) буде визначатися прирівнянням градієнта (11) по вектору c до нуля, тобто:

$$\begin{aligned} \nabla_c R(c) = & \int_x (\nabla_c \Theta(x, c))^T F^T(x, c) P(x) dx + \\ & + \int_x \Theta^T(x, c) (\nabla_c F(x, c))^T P(x) dx = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

У виразі (12) матриця $\nabla_c F(x, c)$ характеризує чутливість функції втрат (7) по вектору c , а вектор $\nabla_c \Theta(x, c)$ – вектор чутливості характеристики функцій по вектору c .

Вважаючи, що характеристики функції (10), що визначають межі Λ_{km} між областями X_k і X_m , при кожному фіксованому векторі c , виражають мінімум середнього ризику (11), їх чутливість повинна бути рівною нулю, і перший інтеграл в рівнянні (12) повинен дорівнювати нулю, тобто

$$\int_x (\nabla_c \Theta(x, c))^T F^T(x, c) P(x) dx = 0.$$

Виходячи з рівняння (12), це означає, що другий інтеграл має дорівнювати нулю, тобто:

$$\int_x \Theta^T(x, c) (\nabla_c F(x, c))^T P(x) dx = 0. \quad (13)$$

Оскільки $\nabla_c \Theta(x, c)$ – вектор багатовимірних δ – функцій, які за винятком точок, що належать межах Λ_{km} між областями X_k і X_m для всіх $k, m = 1, 2, 3$, дорівнюють нулю, то для заданої межі Λ_{sm} між областями X_s і X_m :

$$\nabla_c R(c) = \int_{\Lambda_{sm}} \Delta_{sm}(x, c)^T P(x) dx = \int_{\Lambda_{sm}} f_{sm}(x, c) dx = 0. \quad (14)$$

У виразі (14) вектор $\Delta_{sm}(x, c) = F_s(x, c) - F_m(x, c)$ – різниця векторів втрат станів для областей X_s і X_m , які в цьому разі визначаються відповідними (15) і (16) векторами:

$$F_s(x, c) = [F_{1s}(x, c) F_{2s}(x, c) F_{3s}(x, c)]^T, \quad (15)$$

$$F_m(x, c) = [F_{1m}(x, c) F_{2m}(x, c) F_{3m}(x, c)]^T, \quad (16)$$

У виразі (14) функція $f_{sm}(x, c) = \Delta_{sm}(x, c)^T P(x)$ – розподільча функція, знак якої дозволяє виконувати класифікацію станів СЛК. При цьому рівняння:

$$f_{sm}(x, c) = \Delta_{sm}(x, c)^T P(x) = 0 \quad (17)$$

визначає поверхню, що розділяє області X_s і X_m .

Характерною відмінністю рівняння (17) є те, що розподільча функція визначається заданим видом функцій втрат із точністю до складеного вектора параметрів, що визначається даними й апріорною інформацією про ЕН в СЛК. З огляду на це оптимальний в сенсі мінімуму середнього ризику (11) стан СЛК у цьому разі можна сформулювати в такій формі: дані моніторингу про ЕН СЛК у вигляді $x \in X_k$, тобто дані x відносяться до класу X_k^0 , якщо $\Delta_{km}(x, c)^T P(x) < 0$, для всіх $m = 1, 2, 3$. При цьому вектор c визначається з умови (13).

В окремому випадку, коли за результатами даних моніторингу моделюється два можливих стани СЛК при ЕН об'єкта (ЕН на об'єкті має місце – стан X_1^0 або ЕН на об'єкті відсутній – стан X_2^0) оптимальний в сенсі (11) стан СЛК приймає вигляд: $x \in X_1$, тобто x відноситься до X_1^0 , якщо $f_{12}(x, c) < 0$ і $x \in X_2$, тобто x відноситься до X_2^0 , якщо $f_{12}(x, c) > 0$.

У цьому разі складник вектора, що входить у функцію, буде визначатися за умови (13) для всіх $k, m = 1, 2, 3$. Вирішальне правило для цієї задачі класифікації ЕО об'єкта відрізняється від традиційних вирішальних правил теорії статистичних рішень використанням не фіксованих функцій втрат, а функцій втрат, що задаються із точністю до відновлюваних параметрів і залежних від спостережуваних даних.

Для ілюстрації узагальнюючого характеру описуваного неklasичного підходу розглянемо класичний байєсовський підхід до задачі моделювання станів СЛК при невідомій функції втрат. При класичному підході функції втрат постійні. Це означає, що в цьому разі, виходячи з класичного підходу, в (7) функції втрат для всіх $k, m = 1, 2$ будуть визначатися у вигляді:

$$\begin{aligned} F_{12}(x, c) = w_{12} > 0, F_{11}(x, c) = w_{11} < 0, \\ F_{21}(x, c) = w_{21} > 0, F_{22}(x, c) = w_{22} < 0. \end{aligned} \quad (18)$$

З урахуванням функцій втрат (18) середній ризик (11) буде визначатися величиною:

$$R = w_{11} P_1 \int_{X_1} p_1(x) dx + w_{21} P_2 \beta + w_{12} P_1 \alpha + w_{22} P_2 \int_{X_2} p_2(x) dx, \quad (19)$$

де $\alpha = \int_{X_1} p_1(x) dx$ – умовна ймовірність похибки першого порядку, а $\beta = \int_{X_2} p_2(x) dx$ – умовна ймовірність

похибки другого порядку. Для прийнятих постійних функцій втрат в (7) $\nabla_c F(x, c) = 0$ і розділяє поверхню (15) буде визначатися функцією такого вигляду:

$$f_{12}(x, c) = (w_{11} - w_{12})P_1 p_1(x) = (w_{21} - w_{22})P_2 p_2(x) = 0 \quad (20)$$

На підставі (7) оптимальне вирішальне правило класифікації ЕН об'єкта зводиться до традиційного – визначення достовірності і порівняння його з порогом, який визначається величиною:

$$l_0 = (w_{21} - w_{22})P[(w_{12} - w_{11})P_1]^{-1} \quad (21)$$

Оптимальне правило означає, що якщо $l(x) > l_0$, то спостережувані дані x відносяться до класу X_1^0 (наявність ЕН на об'єкті в СЛК). Якщо ж $l(x) > l_0$, то спостережувані дані відносяться до класу X_2^0 (відсутність ЕН на об'єкті в СЛК).

Під час моделювання СЛК (S) зазначені підсистеми ($SS_i, i=1, 2, \dots, N$) пропонується описувати вісьмома множинами системних компонент, а саме: E – множина елементів; V – множина показників, притаманних елементам множини E , для множини показників V доцільно виділити дві підмножини: V_j – підмножина імен показників; Z_j – підмножина значень показників, що змінюються у часі; W – множина станів системи, елементи якої визначаються значеннями показників (підмножина Z_j), згідно з їх іменами (підмножина V_j), у фіксований момент часу – множина T ; F – множина функцій (дій, операцій), що забезпечують перехід системи від початкового стану до головної мети; C – множина цілей функціонування системи; R – множина відношень, що містить підмножини відношень між самими множинами та між елементами кожної із зазначених множин.

Між цими множинами системної моделі існують такі види відношень: $R_1(E, V_j)$ – відношення відповідності, яке ставить у відповідність кожному елементу множини E деяку вибірку із V_j ; $R_2(V_j, Z_j)$ – відношення відповідності між заданим іменем показника та конкретними його значеннями у момент часу t ; $R_3(Z_j, W)$ – відношення, яке ставить у відповідність кожному елементу множини Z_j підмножину значень елементів множини W у момент часу t ; $R_4(W, F)$ – відношення порядку, яке задає послідовність виконання функцій (дій, операцій) у процесі досягнення головної мети C_0 .

Мета, своєю чергою, може формуватися як вимога щодо досягнення конкретних значень показників чи станів ефективності підсистем СЛК та ефективного виконання захисних функцій СЛК загалом. Тобто, моделюючи СЛК, необхідно виділити такі обов'язкові множини компонент [14, 15, 16], які б забезпечували повноту моделі:

$$M_{SS}^S = \left\{ \begin{array}{l} E^1, E_{SS}^2, \dots, E_{SS}^i, \dots, E_{SS}^N, V^1, V_{SS}^2, \dots, V_{SS}^i, \dots, \\ V_{SS}^N, W^1, W_{SS}^2, \dots, W_{SS}^i, \dots, W_{SS}^N \end{array} \right\},$$

$$F^1, F_{SS}^2, \dots, F_{SS}^i, \dots, F_{SS}^N, C^1, C_{SS}^2, \dots, C_{SS}^i, \dots, C_{SS}^N, R^1, R_{SS}^2, \dots, R_{SS}^i, \dots, R_{SS}^N, \quad (22)$$

$$\begin{aligned} &R(SS_1, SS_2), R(SS_1, SS_3), \dots, R(SS_i, SS_{i+1}), \dots, \\ &R(SS_{i+1}, SS_i), \dots, R(SS_N, SS_{N-1}) \}. \end{aligned}$$

Наведені закономірності структуризації та функціонування підсистем СЛК є початковими правилами щодо виділення системи елементів та компартментів СЛК. З точки зору повноти системної моделі СЛК, на верхніх рівнях декомпозиції обов'язковим є розгляд у взаємозв'язку таких об'єктів:

$$E = \{E^1, E_{SS}^2, \dots, E_{SS}^i, \dots, E_{SS}^N\}, \quad (23)$$

При декомпозиції елементів множини E для кожного елемента ($E^1, E_{SS}^2, \dots, E_{SS}^i, \dots, E_{SS}^N$) із множини (23), пропонується виділити весь набір системних компонент – $\{V, Z, W, F, C, R\}$. Наступна декомпозиція елементів (23) та їхніх компонент залежить від виду досліджуваної підсистеми SS_i , де $i = 1, 2, \dots, N$. Спільною для них усіх є ієрархічність структуризації. Це можна формалізувати описом на теоретико-множинній мові у вигляді дерева взаємовідношень, яке може бути абстрактним рівнем ієрархічної моделі СЛК, де задаються одиниці їх характеристик та взаємовідношення між ними. Тому це буде шестиверстне дерево, де перший граф (G_E) – граф елементів, другий (G_V) – граф показників, третій (G_Z) – граф значень показників, четвертий (G_W) – граф станів, п'ятий (G_F) – граф функцій, шостий (G_C) – дерево (граф) цілей. Цей шестиверстний граф може задавати правила формування системної моделі будь-якої СЛК [17, 18]. Тому модель СЛК пропонується подавати у вигляді графа, де на рівні першої верстви можуть розміщуватися ієрархічні структури усіх підсистем компартментів СЛК та зовнішнього середовища. Для графічного подання усіх верств графа СЛК пропонується використовувати елементи макро-, мезо- та мікрорівня СЛК. Елементи множин $E^1, E_{SS}^2, \dots, E_{SS}^i, \dots, E_{SS}^N$ (граф G) вказують на верхній рівень декомпозиції СЛК та, відповідно, можуть бути описані тривірневими графами.

Висновки. Таким чином, досліджено неklasичний підхід до вирішення завдання визначення станів технічної та природної сфери в СЛК за спостережуваними даними за відсутності можливості точного визначення відповідних функцій втрат (ризиків) для вирішальних правил. Основна відмінність найкращого вирішального правила станів СЛК полягає в тому, що розділююча функція визначається довільним видом функцій втрат з точністю до складеного вектора параметрів, що залежать від спостережуваних даних і часткової апріорної інформації про компартменти СЛК. Сформульовано оптимальне в сенсі мінімуму розглянутого неklasичного середнього ризику вирішальне правило станів СЛК для трьох можливих станів компартментів цього СЛК (інертність, відновлювальність, пластичність). Під час аналізу СЛК компартмент з його підсистемами та ярусами розглядається як рівноцінний компонент відносно інших. Однак, виходячи з основ теорії біотичної регуляції навколишнього середовища, де головним компонентом екосистеми виступає біота, такий підхід вимагає певних корекцій, що витікає

з основних властивостей живого, його організації, функціонування. Можна зробити відповідний висновок, що індикатором різноманітності, стану рівноваги та порушення СЛК є рослинність, а регуляторним механізмом його формування, відновлення від початкового до рівноважного стану, стабілізації виступає компартмент. Тому оцінка стану СЛК, його потенціалу, стійкості повинна базуватися на порівняльній оцінці сукцесійних стадій (серій) угруповань в компартменті від початкового до стійкого клімаксового стану.

Виходячи з такого розуміння, що ґрунтується на законах термодинаміки, ключове місце в оцінці ризику посідає дослідження сукцесійного розвитку компартменту. Сукцесія розглядається як такий процес розвитку, що відбувається завдяки реалізації біоти потенційних можливостей перебудови структури компартменту відносно зміни навколишнього середовища. Інакше кажучи, розвиток компартменту описується векторним полем у фазовому просторі. Одночасно такий розвиток супроводжується зміною зовнішніх (кліматичних, гідрологічних, едафічних характеристик), які на виході з СЛК можуть суттєво відрізнитися від фонових (вхідних). Переходи СЛК через послідовну зміну стійких станів її компартментів розглядаються як аттрактори стійкості. Хоча це самоорганізований та самопідтримуючий процес, однак він спрямований у бік удосконалення механізмів акумуляції енергії через адаптаційні властивості видів, зниження енергетичних витрат, а відтак зниження показників ентропії, що означає наближення до стійкого, але водночас і термінального стану, а тому зростає ризик руйнування компартменту. Як вважає Р. Уїттекер [19], у процесі сукцесії підвищується продуктивність компартменту, його біорізноманітність, зростає стійкість. Сукцесія – це не лінійний, не строго детермінований, а стохастичний, імовірнісний процес. Це означає, що кожен ярус підсистеми компартменту (ценопопуляція) може бути заміщений іншим, краще адаптованим до існуючих умов або преадаптованим для наступних можливих змін, і таке заміщення відбувається на всіх етапах процесу, у кожній з підсистем компартменту. Таким чином, показник біотичного різноманіття тих елементів, які можуть

взаємозаміщуватися у процесі сукцесії, має ключове значення, оскільки зниження біорізноманіття (або окремих його форм) звужує область стійкості. Хоча компартмент може бути досить стійким і при вузькій області, тобто при досить обмеженій кількості видів (наприклад, букові ліси). Але при цьому можливі варіанти заміщення, і ймовірність формування різноманітності стійких станів звужується.

Врешті, головне завдання полягає в тому, щоб оцінити положення цього компартменту у сукцесійному ряді, і в цьому відношенні в геоботаніці є фундаментальні напрацювання, зокрема щодо оцінки швидкості, етапів розвитку ценозів (сингенез, ендекогенез, філценогенез), уявлення про різні форми клімаксу, сукцесійні ряди, серії тощо.

Перспективи використання результатів досліджень. Виходячи з цих розробок, запропоновано такі індикаторні ознаки або характеристики, за якими будемо оцінювати дві групи характеристик компартменту: кількісні показники його зміни, тобто швидкість сукцесій (V), та масштабність змін (S), тобто їхній часовий та просторовий стан $f(V, S)$. Причому можуть бути використані як безпосередні, так і опосередковані характеристики. До числа останніх належить, наприклад, наявність у складі ярусів чи підсистем компартменту видів, занесених до Червоної книги, охоронних списків, тобто таких, що підлягають охороні, бо такі види, як правило, пов'язані з рідкісними компартментами або надмірно експлуатуються, тобто знаходяться у зоні більшого ризику руйнування, ніж ті, де такі види відсутні. Для такої оцінки важливі і такі характеристики, як показники гемеробії, що відображають здатність видів рослин зростати і поширюватися у різного ступеня перетворених людиною екосистемах: а-, оліго-, мезо-, еу-, по-, лі-, метагемероби. Іншою ознакою є типи стратегій поведінки видів, що відображають їхнє відношення до заселення та утримання компартменту: R – стрес-толеранти заселяють екстремальні екотопи; S – патієнти утримуються за рахунок конкуренції, протидії впливу зовнішніх факторів, тобто характеризують інерційність ценозу; K – експлєренти, що швидко реагують і характеризують ступінь резистентності ценозу.

Література

1. Абдрахманов Н.Х., Абдрахманова К.Н., Ворохобко В.В., Шайбаков Р. А. Современное состояние разработки методологии анализа системных рисков при проектировании и эксплуатации нефтегазового оборудования опасных производственных объектов. *Нефтегазовое дело*: электрон. науч. журн. Уфа: УГНТУ, 2014. № 3. С. 359–376. URL: http://ogbus.ru/issues/3_2014/ogbus_3_2014_p359-76_AbrakhmanovNKh_ru.pdf.
2. Акимов В.А., Лесных В.В., Тимофеева Т.Б. Проблема выбора оптимальной структуры национальной системы возмещения ущерба от природных и технологических чрезвычайных ситуаций. *Проблемы безопасности чрезвычайных ситуаций*. Х., НУЦЗ Украины, 2006. № 6. С. 15–26.
3. Абдрахманов, Н.Х. Управление промышленной и экологической безопасностью объектов нефтепереработки и нефтехимии на основе анализа рисков. *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. М.: Открытое акционерное общество Всероссийский науч.-исслед. ин-т организации, управления и экономики нефтегазовой промышленности, 2013. № 3. С. 5–9.
4. Абдрахманов Н.Х., Абдрахманова К.Н., Ворохобко В.В., Шайбаков Р. А. Современное состояние разработки методологии анализа системных рисков при проектировании и эксплуатации нефтегазового оборудования опасных про-

- изводственных объектов. *Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн.* Уфа: УГНТУ, 2014. № 3. С. 359–376. URL: http://ogbus.ru/issues/3_2014/ogbus_3_2014_p359-76_AbrakmanovNKh_ru.pdf.
5. Фельдбаум, А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М.: Наука, 1968.
 6. Цыпкин, Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М.: Наука, 1968.
 7. Li B.-L., Gorshkov V.G., Makarieva A.M. Allometric scaling as an indicator of ecosystem state: a new approach // I. Petrosillo et al. (eds.) *Use of Landscape Sciences for the Assessment of Environmental Security*, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, Springer, the Netherlands, 2008. P. 107–117.
 8. Borgatti, S.P., Everett, M.G., Freeman, L.C. *UCINET VI*. Software for Social Network Analysis. Natick: Analytic Technologies, 2002.
 9. Johnson, S.C. Hierarchical clustering schemes. *Psychometrika* 32, 1967. 241–253.
 10. Borgatti, S.P., Everett, M.G. Two algorithms for computing regular equivalence. *Social Networks* 15, 1993. 361–376.
 11. Luczkovich, J.J. et al., 2003. Defining and Measuring Trophic Role Similarity in Food Webs Using Regular Equivalence. *J. Theor. Biol.* 220(3), 303–321.
 12. Погребняк П.С. Основы лесной типологии. К.: Изд-во АН УССР, 1955. – 456 с.
 13. Ткачев Ю.А., Юдович Я.Э. Статистическая обработка геохимических данных. Л.: Наука, 1975.
 14. Лавинский Г.В. Построение и функционирование сложных систем управления. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. 336 с.
 15. Методи побудови та вдосконалення організаційних структур URL: <http://library.if.ua/book/32/2125.html>
 16. Организационные структуры управления производством / [Под ред. Б. З. Мильнера]. Москва: Экономика, 1975. 320 с.
 17. Курінний О.В. Аналіз методів проектування організаційних структур. URL: http://www.confcontact.com/2007may/8_kurin.htm
 18. Одрехівський М.В. Системний підхід до організаційного моделювання інноваційних підприємств. *Розвиток суб'єктів господарювання України: сучасні реалії та перспективи: колективна монографія* / за заг. ред. Л.М. Бандоріної, Л.М. Савчук. Дніпро: Пороги, 2017. С. 139–153.
 19. Уиттекер Р. Сообщества и экосистемы. Москва, Изд-во Прогресс, 1980. 326 с.