

УДК 519.713: 631.411.6

**ІНФОРМАЦІЙНО-МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОСТІ
СИСТЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ**

Т.В. КОЗУЛЯ, Н.В. ШАРОНОВА, Д.І. ЄМЕЛЬЯНОВА, М.М. КОЗУЛЯ

Надано теоретичні засади обґрунтування методології комплексної оцінки екологічності на основі MIPS-аналізу та імовірісно-ентропійного ризик-аналізу для розв'язання задач екологічної безпеки територіально-об'єктових систем та ідентифікації факторів, які відповідають за ступінь прояву хвороби й рівень стану здоров'я людини. Дослідження підходів з встановлення взаємозв'язку між рівнем екологічності навколишнього середовища і станом здоров'я людини визначили за необхідне прийняття універсальної характеристики екологічної якості різнорідних систем у вигляді ентропійної оцінки відповідності їх вимогам безпеки або рівноважного стану. Перевагою запропонованою методики екологічної оцінки складних об'єктів (природно-техногенних комплексів) є можливість однозначної характеристики складових і системи в цілому, надання цілісного програмного комплексу подання кінцевого результату.

ВСТУП

Актуальність дослідження полягає у розв'язанні однієї з пріоритетних задач системи екологічного моніторингу з визначення комплексної еколого-гігієнічної оцінки природно-техногенних комплексів (ПТК) у вигляді кількісної характеристики рівня екологічності територіально-об'єктових угруповань, наданих як інтегроване утворення систем, під час урахування подальшого їх економічного розвитку відповідно до вимог забезпечення стабільності екологічної якості та зменшення навантаження на навколишнє природне середовище (НПС). Існуючі підходи з визначення порушень безпеки засновані на порівняльних методиках або еталонних методах встановлення рівня забруднення окремих об'єктів навколишнього середовища та інтегровальної індексної оцінки якості довкілля [1–3]. Суттєвим недоліком такого підходу є відсутність аналізу процесів, що відбуваються у ході трансформацій техногенних факторів і відповідним чином впливають на природні елементи НПС. Саме такі процеси корегують стан і діяльності ПТК та дію середовища на стан здоров'я населення.

У роботі досліджені питання формування нового підходу щодо визначень функціонування системних об'єктів природно-техногенного походження. Запропоновано за наявності якісної й кількісної інформації з моніторингу довкілля або стану здоров'я населення, виходити з аналізу наявних

градієнтів у значеннях досліджених параметрів стану систем і процесів, які супроводжують ці зміни. Для однозначної оцінки зазначених аналітичних характеристик застосовано ентропійну функцію стану і процесів, виходячи зі змістовності цього параметру й термодинамічної природи соціально-еколого-економічних об'єктів.

Мета дослідження — обґрунтування методологічного забезпечення комплексної оцінки екологічності ПТК і стану здоров'я людини за імовірно-ентропійним підходом за умови розв'язання таких задач:

1) розробка математичної моделі комплексної імовірно-ентропійної ризик-оцінки рівня екологічної безпеки природно-техногенних об'єктів на основі дослідження «стан-процес» з метою встановлення рівня негативного впливу на об'єкти НПС і людину;

2) формування ентропійної моделі виявлення факторів поважності (небезпечності) захворювання і груп наслідків;

3) практичне опробування моделі комплексної оцінки екологічності стану техногенно-навантажених об'єктів за наданою методикою з метою забезпечення об'єктивності управлінських рішень.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ Й АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Методика комплексної екологічної оцінки якості складних територіально-об'єктових систем визначається формуванням імовірно-ентропійного підходу з аналізу даних моніторингу за трьома аспектами — економічним, екологічним і соціальним, відповідно до вимог концепції сталого розвитку. Методика полягає в удосконаленні інформаційно-екологічної складової моніторингу НПС на рівні територіально-об'єктового угруповання. Розв'язання екологічних задач з усвідомлення еколого-соціально-економічної інформації й отримання екологічних знань для пошуку балансу між інтересами систем і загальною екологічною змістовністю об'єкта передбачає застосування моделі ПТК, об'єкта, який було досліджено. Методичне забезпечення оцінки екологічності складних систем розроблено з урахуванням визначеного взаємозв'язку між станом і процесами внутрішньої самоорганізації і зовнішнього зв'язку з навколишнім середовищем відповідно до правил системного гомеостазу. Розглянуто два базових аспекти з обґрунтування методології комплексної оцінки екологічності навколишнього середовища:

- встановлення структури моделі системного об'єкта на екологічних засадах і її математичний опис;
- визначення екологічності систем за імовірно-ентропійною оцінкою на основі термодинамічного аналізу, положень синергетики, теорії ризиків;
- визначення особливостей моделювання системних об'єктів і формування інформаційно-управляючої бази для розв'язання задач з імовірно-ентропійної оцінки екологічності природної, економічної і соціальної систем територіально-об'єктового угруповання.

Оцінка споживання природних ресурсів і ресурсомісткості продукції є характеристикою навантаження на НПС [4, 5]. Відповідно до теорії екологічного менеджменту така оцінка здійснюється в межах MIPS-аналізу на основі MI-індексів, що є показником питомої ресурсомісткості виробництва продукції:

$$R_{np} = R_n/Q, \quad (1)$$

де R_{np} — питоме споживання цього виду природного ресурсу на одиницю готової продукції, (г, кг, т, м³)/(т, шт., м, м³); R_n — витрата цього виду ресурсів на виробництво продукції (г, кг, т, м³); Q — обсяг валової продукції або продуктивність техногенної складової ПТК (т, шт., м, м³).

Для визначення змістовності МІ-індексів як оцінки «екологічної вартості» готового продукту і подальшого їх узгодження з характеристикою порушень природної якості на рівні ПТК запропоновано використання таких індикаторів природокористування:

- Показник екологічності процесу (L) — величина шкідливих впливів на НПС в розрахунку на одиницю корисної продукції чи послуги, що надається на основі даного процесу:

$$L = P_B/Q, \quad (2)$$

де P_B — кількість природних ресурсів, які використовуються для виробництва одиниці продукції (г, кг, т, м³); Q — вартість готової продукції (т, шт., м, м³).

Величина P_B дозволяє врахувати специфічні умови забезпечення виробництва і екологічність одержаної продукції у вигляді зафіксованих констант (МІ-індексів) природної цінності використаних ресурсів і збитковості для природних комплексів такої діяльності, встановлюючи екологічну ціну продукту з урахуванням обсягів вилучення, стійкість і наслідки техногенного навантаження територій природокористування у вигляді змін природного стану екосистем, що дозволяє у подальшому фіксувати це як ентропійний зсув ΔS :

$$MI_S = \Delta S/Q \quad \text{чи} \quad MI_S = \Delta S/\Delta Q. \quad (3)$$

- Коефіцієнт екологічності об'єкта (ε_n) визначається як відношення «умов збереження природного середовища» від виготовлення продукції (подібно до чистого корисного ефекту ($Q - P_B$)) до кількості витрачених природних ресурсів (R_n) з урахуванням ресурсозабезпечення (1) та (2) та сталого природокористування виробництва (3):

$$\varepsilon_n = \frac{Q - P_B}{R_n} = \frac{1 - L}{R_{np}} = \frac{1 - MI_S}{R_{np}}. \quad (4)$$

Вилучення ресурсів, вплив виготовлення і споживання продукції на природні об'єкти є складовими комплексного аналізу екологічної ефективності виробництва продукції (рис. 1).

Таким чином, екологічна цінність отриманої продукції з врахуванням збитку від впливу на НПС перевищує цінність виготовленої продукції, якщо коефіцієнт $\varepsilon_n > 1$. Об'єкти, для яких $\varepsilon_n < 1$ і умова екологічності не виконується, слід розглядати як екологічно неефективні, оскільки чиста віддача від природних ресурсів, що використовуються не перевищує їх цінності.

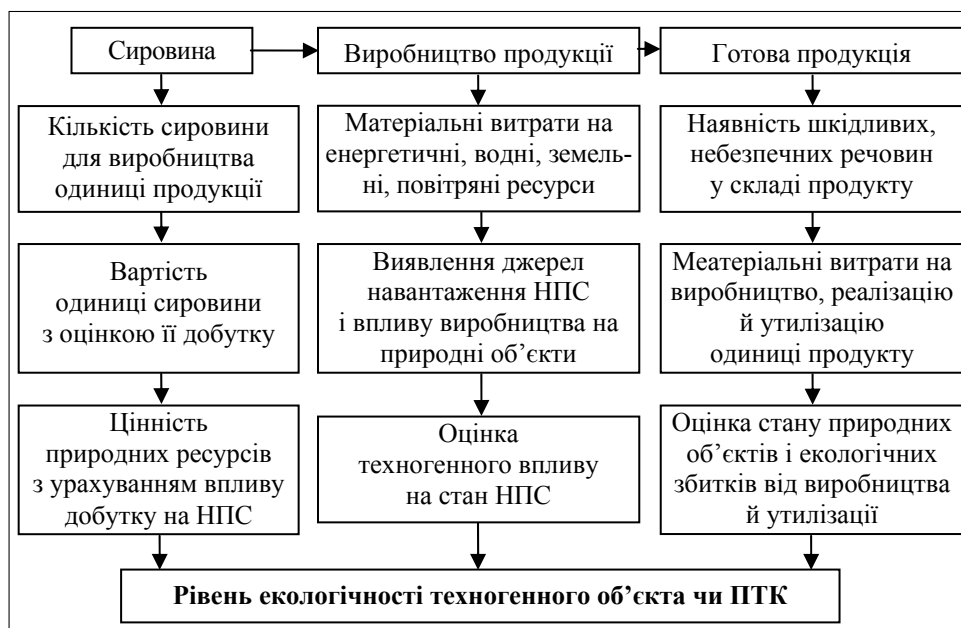


Рис. 1. Складові навантаження НПС під час виробництва продукції

Концепція досліджень системних об'єктів передбачає імовірнісно-ентропійний аналіз змін у комплексній їх моделі, прийняття рішення щодо управління якістю НПС на основі ентропійного ризик-оцінювання характеристик фактичного стану еколого-соціально-економічної системи на рівні природно-техногенних геосистем (ПТГС) і різнорівневих ландшафтно-геохімічних комплексів з визначенням заходів регулювання або стабілізації гомеостазу «об'єкт – процес – НПС» (рис. 2).

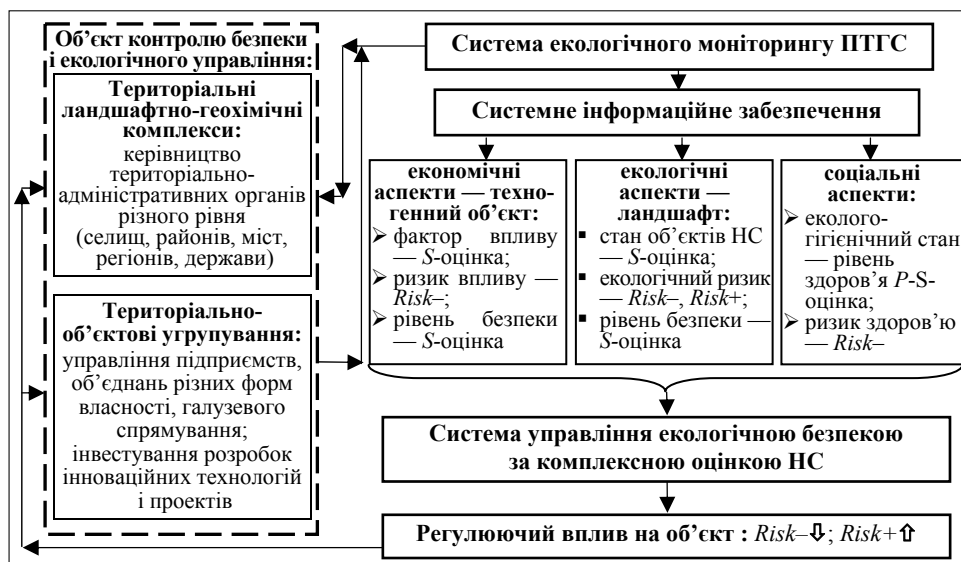


Рис. 2. Схема ентропійного ризик-аналізу стану системних об'єктів

Екологічна складова ентропійної ризик-оцінки передусім стосується стану фактора впливу, який встановлено за даними моніторингу територіаль-

них ландшафтно-геохімічних комплексів. Вона фіксує вплив фактора як відхилення від мінімально встановленого навантаження на НПС, що дозволяє у ході статистичної обробки даних спостережень визначити імовірність певного рівня небезпеки. Чим менша така імовірність, тим більша за умови інтенсивності діяльності об'єкта ентропія перетворень фактора, що може приводити до позитивних або негативних змін в об'єктах НПС.

Якщо ймовірність змін менше 0,1, то ризик порушень низький (до 10%), але зростає ризик невизначеності стану системи: збільшення значення $|S(P)|$ порівняно з попереднім оцінюванням стану системи — перебудова системи, таким чином, виникає необхідність дати характеристику змін в об'єкті (системі) або діючого фактора; за умови $\Delta S \rightarrow 0$ існує мала ймовірність у цій області до підвищення інформативності (рис. 3а,б (1)). Тоді K^{opt} — це природний стан, характеристика $(K - K^{opt}) \rightarrow 0$ приймається при $\Delta S \rightarrow 0$ як для стану системи, так і для досліджуваного фактора умовою відповідності принципу максимуму ентропії й стійкості системи. Ризик такої оцінки стану й фактора впливу визначається як інформаційна ентропія, яка в цілому оцінює ситуацію – макрорівень синтезу розв'язку задачі. За класичною шкалою ризик-аналізу необхідно провести обмеження над $P = 0,3$ (рис. 3а,б (1)). При малому ризyku на макрорівні для стану системи з $P = 0,4$ (рис. 3), верхня границя локальної складової інформаційної ентропії — 0,38, що має тенденцію до зменшення, є уявною складовою реально існуючої інтегральної інформаційної ентропії й відбиває гадану для цієї ситуації в системі («фрагмента системи») ступінь незнання. Відповідно до запропонованої ентропійної оцінки стану І.В. Прингішвілі [7]: величина 0,38 є «золотим перетином» чисельного ряду й пов'язана з гармонією системи (рис. 3,б (2)).

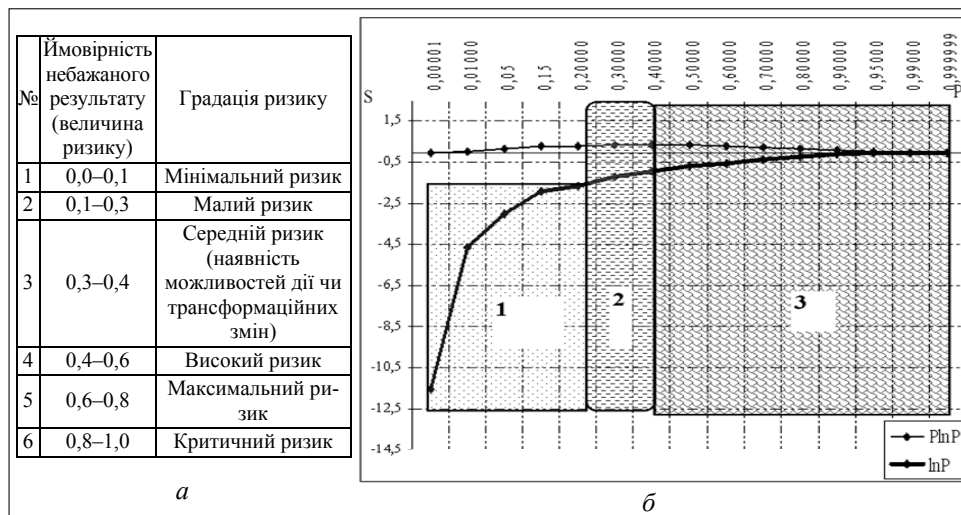


Рис. 3. Ризик-оцінка й ентропійна характеристика стану систем: а — загально-прийнята шкала ризик-оцінки; б — зв'язок між структурною та інформаційною ентропією (1 — зона ризику незнання, 2 — зона «золотого перетину»; 3 — область досягнення самоорганізаційного гомеостазу)

Інтегральну ентропію системи становить сукупність усіх локальних ентропій системи, що з'являються в процесі самоорганізації, і досягнення нею стійкого стану гомеостазу з НС (ентропійний ризик $Risk = -P(X) \cdot \ln[P(X)] \rightarrow 0$, рис. 3,б (3)). Це відповідає підвищенню рівня структурної ентропії на рівень реалізації взаємної стабілізації зв'язків усередині системи й системи з НС.

Згідно з роботами І.В. Прингишвілі [7] і А.Н. Панченкова [8, 9] маємо постійну характеристику для даного реалізованого природнього стану системи у вигляді суми інформації (I) і ентропії (S), що узгоджується з першим законом термодинаміки — збереження обсягу енергії й матерії для певного стану системи, і його зв'язком з другим законом. Таким чином, зміни досягають максимуму й відбувається перетворення структурної ентропії в інформаційну, усуваючи конкретні нестабільності й досягаючи максимуму в цілому для системи, збільшення інтегральної ентропії в інформації [7].

У ході розв'язку завдань регіонального або галузевого рівня з екологічної оцінки техногенного впливу актуальним є характеристика його відповідності екологічним вимогам. Це здійснюється на основі існуючої системи оцінок у системі екологічного менеджменту. З метою підвищення екологічної пріоритетності в ПР запропоновано вдосконалення у вигляді ентропійного ризик-аналізу з оцінкою змін стану системи й факторів впливу на неї.

Для оцінки процесів у складових об'єкта дослідження, імовірності впливу на організми і людину запропоновано розраховувати вірогідність трансформацій за ентропією діючого фактора [6].

Захворювання визначається станом життєвого процесу, пов'язаного з просторовим ареалом, соціальним, економічним середовищем і умовами природної еволюції. Важливу роль відіграють такі фактори як стиль життя, рівень культури, можливості охорони здоров'я. Для уникнення важкості врахування усіх можливих впливів на стан організму людини і формування певної схильності до хвороби встановимо, що не існує абсолютно детермінованого знання природи хвороби (причин, факторів, подій), хоча мають місце причини і її наслідки. Хвороба визначена дестабілізацією квазістаціонарного стану організму як біохімічної системи, що є основою для ідентифікації механізмів хвороби.

Імовірність перебігу процесів у організмі людини під час появи відхилень у стані або функціонуванні органів і систем надано у такій послідовності [10]:

- середньоквадратичне відхилення порушень стану від мінімально зафіксованого

$$\sigma(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{\text{lenght}(X)-1} (X_i - \min(X))^2}{\text{lenght}(X) - 1}}, \quad (5)$$

- імовірність відхилення порушень від мінімально можливих змін

$$P(X, x1, x2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(X)} \left[\frac{-1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{1}{2} \sqrt{2} \frac{(-\max(X) + \min(X))}{\sigma(X)} \right) \right] \frac{\pi^1}{2} \sqrt{2}\sigma(X) +$$

$$+ \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{1}{2} \sqrt{2} \frac{(-\operatorname{mean}(X) + \min(X))}{\sigma(X)} \right) \frac{\pi^1}{2} \sqrt{2} \sigma(X) \Big], \quad (6)$$

- ризик дестабілізації організму виду інформаційної ентропії

$$S(P) = \ln P(X, x1, x2), \quad Risk = S1 = -P(X) \ln [P(X)], \quad (7)$$

де $S(P)$ — ентропійна оцінка порушень, $Risk$ — інформаційна ентропія як узагальнена характеристика рівня небезпеки

Стан системи визначається за оцінкою імовірності відхилення порушень від стану квазістабільності організму:

- середньоквадратичне відхилення від стабільного стану

$$\sigma\sigma(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{\operatorname{lenght}(X)-1} (X_i - 0)^2}{\operatorname{lenght}(X) - 1}}, \quad (8)$$

- імовірність відхилень від нормативних відповідностей (обмежень)

$$PP(X, x1, x2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma\sigma(X)}} \left[\frac{-1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{1}{2} \sqrt{2} \frac{(-\max(X) + 0)}{\sigma\sigma(X)} \right) \frac{\pi^1}{2} \sqrt{2} \sigma\sigma(X) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{1}{2} \sqrt{2} \frac{(-\min(X) + 0)}{\sigma\sigma(X)} \right) \frac{\pi^1}{2} \sqrt{2} \sigma\sigma(X) \right], \quad (9)$$

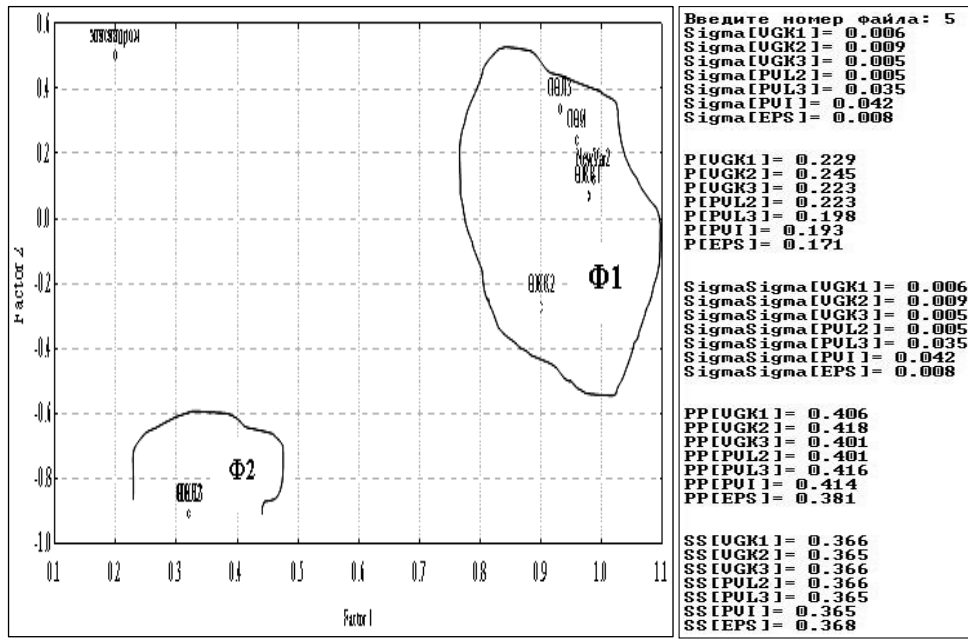
- ентропійна оцінка екологічної небезпеки як рівень невпорядкованості системи

$$SS(P) = \ln [PP(X)], \quad Risk = -PP(X) \ln [PP(X)]. \quad (10)$$

Якщо імовірність відхилення від фонового стану більше ніж 0,2 вагомим, то виявляють фактори дестабілізації організму і формування певної групи здоров'я.

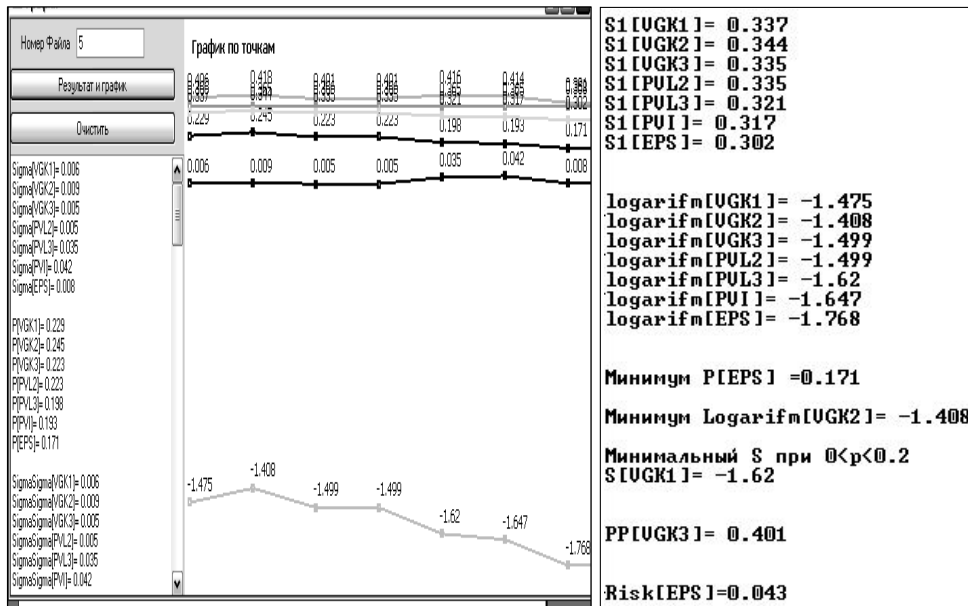
Для прикладу надано результати оцінки ризику здоров'ю за якісними даними спостережень за станом дітей, вражених церебральним паралічем (ДЦП). Послідовний аналіз дії дестабілізуючих параметрів з використанням факторного і кластерного аналізу і програмна реалізація пошуку ентропійної оцінки стану здоров'я надала однакові результати (рис. 4 а, б). Наприклад, у групі «не ходьба» за даними статистичного аналізу $p=1,93VGK3 + 2,28PVI + 0,0006$, де $VGK3$ — внутрішній шлунковий крововилив 3 ступеня, PVI — протівірусний імунітет. Саме такі фактори визначають ризик потрапляння в цю групу.

Дослідження специфіки факторів прояву ДЦП встановило, що суттєвими у ході реалізації трьох груп макростанів організму як нестабільного стану (неходьба) є внутрішньо шлунковий крововилив 3 ступеню ($VGK3$) і PVI , квазістабільного після хвороби (ходьба, вспомн_ходьба) є внутрішньо шлунковий крововилив 1, 2 ступеню ($VGK1, VGK2$), PV лейкомаляція 2-го ступеню ($PVL2$), гендерний вік за полом дитини — найбільш уразливі хлопчики 31-го тижня, що підтверджено результатами двох методик (рис. 4) [10, 11].



а

б



в

Рис. 4. Взаємозалежність факторів групи «не ходьба», ризик-аналіз стану хворих: а — кластерний аналіз факторів аналізу рівня захворювання; б — фрагмент розрахунку дестабілізуючих факторів; в — фрагмент програмної реалізації ентропійної оцінки факторів захворювання на ДЦП

Оскільки організм через деякий час стабілізується після хаосу на певному рівні та зміни ентропії організму досягають нульової міри, то генерована множина макрорівня параметрів стану визначається функцією нормального розподілу (рівняння (6) і (9)). Імовірнісні характеристики при достатньо великому обсязі множини окремих ефектів мають «гострий» максимум, що дозволяє постулювати реалізованість одного макростану, який відповідає максимуму ентропії.

Таким чином, доцільність переходу до ентропійного оцінювання ризику здоров'ю, як і екологічного, визначена можливістю співставлення факторів стабілізації, що дозволяє встановити ступінь імовірності позитивного ефекту запровадження заходів профілактики захворювання чи його лікування (аналіз ентропійних змін від попереднього стану).

Комплексне оцінювання небезпеки екологічної і для здоров'я населення на території дослідженого природно-техногенного угруповання загалом дозволяє встановити зв'язок між забрудненням, процесами його змін в об'єктах навколишнього середовища і формуванням факторів негативного впливу довкілля на людину, зміни захворюваності населення та встановлення факторів поліпшення екологічної ситуації (рис. 5).

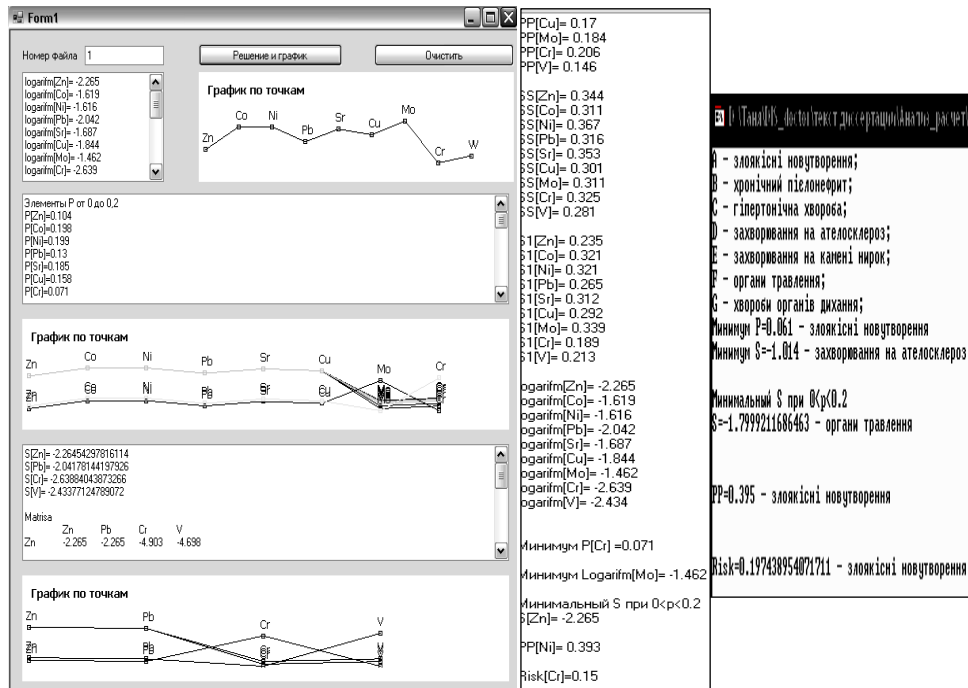


Рис. 5. Комплексна оцінка небезпеки екологічної і для здоров'я населення (дані по Зміївському полігону)

Таким чином, запропонована методика комплексного оцінювання дослідженого об'єкта небезпеки, визначеного як системне утворення на рівні «стан–процес», є новітнім кроком у підвищенні ефективності прийняття рішення в системі екологічного управління безпекою.

ВИСНОВКИ

Питання комплексного ентропійного оцінювання стану небезпеки навколишнього середовища, які було досліджено у роботі, дозволили отримати такі результати і запропонувати практичну методику екологічного ризик-аналізу.

- Оцінка екологічних збитків для НПС від виробництва з урахуванням життєвого циклу продукції (умови (1) і (2)) являє собою узагальнену функцію порушення НПС кожної складової комплексної оцінки екологічності на рівні виробництва і ПТК у вигляді ентропійної оцінки MI-індексів (3).

- Екологічність природно-техногенного об'єкта визначається збереженням гомеостазу для його складових систем з урахуванням показників екологічної безпеки: економічного — максимізація ефективності виробництва і мінімізація потоку із системи (викидів, скидів, утворення відходів); соціального — максимізація до економічно можливої величини суспільного здоров'я людини; екологічного — максимізація природної біологічної продуктивності екосистем.

- Впровадження ентропійної оцінки «стан-процес» для ситуацій з захворюванням показало, що для макрорівня аналізу явища розглядають багаточисельні індивідуальні випадкові й незалежні події якісного і кількісного визначення, які є відображенням стану організму і апріорними ймовірностями та ентропійними характеристиками змін у ньому (7, 9) (рис. 3, 4).

- Ентропійна оцінка імовірнісних параметрів з аналізу досліджених системних об'єктів природно-техногенного змісту дозволяє отримати комплексну його характеристику з встановленням пріоритетних факторів стабілізації безпечного його стану (визначити факторну систему підтримки прийняття екологічного рішення). Обчислення показників, що наведено в статті, спираються на програмну реалізацію, розроблену в Microsoft Visual Studio 2005. Підсумкові дані виводяться у вигляді звіту (рис. 5).

ЛІТЕРАТУРА

1. Згуровський М.З. Сталий розвиток в глобальному і регіональному вимірах. — К.: Вид-во «Політехніка», 2006. — 85 с.
2. Качинський А.Б. Системний аналіз визначення пріоритетів в екологічній безпеці України. — К.: Національний інститут стратегічних досліджень. — 46 с
3. Лисиченко Г.В., Забулонов Ю.Л., Хміль Г.А. Природний, техногенний та екологічний ризики: аналіз, оцінка, управління. — К.: Наук. думка, 2008. — 543 с.
4. Риттхофф М., Рон Х., Мертен Т. Вычисления MIPS: ресурсная продуктивность продукции и услуг // Основы теории эко-эффективности: под науч. ред. О.Сергиенко, Х. Рона. — СПб, 2004. — С. 357–366.
5. Сергиенко О., Рон Х. Основы теории эко-эффективности: монографія. — СПб.: СПбГУНиПТ, 2004. — 223 с.
6. Касімов О.М., Козуля Т.В., Ємельянова Д.І., Козуля М.М., Гагар В.В. Методи і модель системи комплексного оцінювання екологічного стану природно-техногенних територій // Екологія і промисловість. — 2012. — № 1. — С. 21–27.
7. Прангишвили И.В. Энтропийные и другие системные закономерности: Вопросы управления сложными системами. — М.: Наука, 2003. — 428 с.
8. Панченков А.Н. Энтропия. — Нижний Новгород: Интелсервис, 1999. — 592 с.
9. Панченков А. Н. Энтропия-2: Хаотическая механика. — Нижний Новгород: Интелсервис, 2002. — 713 с.
10. Козуля Т. В., Шаронова Н.В. Практична реалізація концепції корпоративної екологічної системи для інтегральної оцінки екологічного ризику здоров'ю // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2010. — № 4. — С. 100–109.
11. Єріна А.М. Статистичне моделювання та прогнозування: Навч. посібник. — К.: КНЕУ, 2001. — 170 с.

Надійшла 30.05.2013