

## ЕНТРОПІЙНО-РИЗИКОВА ОЦІНКА СТАНУ ТЕХНОГЕННО-ПРИРОДНИХ КОМПЛЕКСІВ ПРОМИСЛОВИХ ТЕРИТОРІЙ

УДК 519.713:504.064

### КОЗУЛЯ Тетяна Володимирівна

к.геогр.н., доцент кафедри комп'ютерного моніторингу  
і логістики НТУ «Харківський політехнічний інститут».

**Наукові інтереси:** складні системи, синергетика і термодинамічний аналіз  
соціально-еколого-економічних систем, екологічний моніторинг.

**e-mail:** kozulja@kpi.kharkov.ua

### ЄМЕЛЬЯНОВА Дар'я Ігорівна

студентка НТУ «Харківський політехнічний інститут».

**Наукові інтереси:** прийняття рішень в системі екологічного моніторингу;  
моделювання фізико-хімічних процесів у природних системах.

**e-mail:** sone4ko-2008@yandex.ru

### КОЗУЛЯ Марія Михайлівна

студентка кафедри комп'ютерного моніторингу  
і логістики НТУ «Харківський політехнічний інститут».

**Наукові інтереси:** системний аналіз, екологічний моніторинг.

### ГАГАРІН Віталій Вікторович

к.т.н., доцент кафедри інформаційних технологій

в міському господарстві Харківської національної академії міського господарства

**Наукові інтереси:** системний аналіз складних систем.

### АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ

Зумовлена необхідністю розвитку теоретико-практичних основ екологічних досліджень з оцінки якості навколишнього середовища (НС) відповідно до прийнятої державної концепції екологічної політики України. Математичне моделювання у галузі екологічних знань зазнає значних змін у зв'язку з розвитком уявлень про системність і складність об'єкта екологічних досліджень – еколого-соціально-економічна система. За останніми пропозиціями більш доцільним є звернення до систем-системних уявлень про екологічні об'єкти [1], необхідність розробки нових універсальних показників якості стану різномірних складових системи екологічних досліджень [2].

### МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

При аналізі екологічної якості стану складного об'єкта згідно з запропонованою методологією комплексної оцінки екологічності систем (КЕС) використовується структурна і параметрична ідентифікації рівноваги систем і необоротних процесів, визначених самоорганізацією об'єкта [3]. Відповідно до системної моделі об'єкта (обов'язкове виділення економічного, екологічного і соціального аспектів об'єкта дослідження) передбачається згідно з теорією ентропії, синергетики та негентропії перехід від системного аналізу стану мікрооб'єкту до визначення перебігу процесів, що відповідають за гомеостаз внутрішнього середовища інтегру-

вальної системи і рівновагу «об'єкт – навколишнє середовище» – зовнішній гомеостаз.

Таким чином, задачею дослідження є визначення умов наведення екологічного порядку, тобто переведення системи з екологічно неупорядкованого стану до структурованого за рахунок забезпечення для «система-середовище» не випадкового, а кооперативного інформаційного зв'язку, що призводить до «колективного екологічного стану», який описується одним параметром порядку і реалізується за рахунок необоротних процесів. Характеристикою екологічності запропоновано визначити ентропію, як функцію стану системи, ймовірності порушення рівноваги і виникнення передумов перебігу певних трансформаційних процесів.

Формування задачі ідентифікації ступеня екологічності територіально-об'єктових систем передбачає розв'язання таких питань:

1) визначення відповідно до методології КЕС<sub>sw</sub> рівноцінних систем і процесів в них за єдиною ентропійною

функцією кількісної характеристики їх екологічності (відсутність негативного впливу на об'єкти біосфери і людину);

2) проведення розрахунків оцінки екологічності стану техногенно-навантажених об'єктів за наданою методикою і забезпечення об'єктивності отриманих результатів.

**МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ І АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ**

Для вирішення комплексної екологічної задачі за методологією КЕС пропонується на основі ймовірнісно-ентропійних характеристик стану систем і процесів (P, S і параметр стану x) перейти від результатів аналізу статистичних спостережень до характеристики термодинамічних потоків (процесів), які дозволяють утримати систему в стані рівноваги ( $\Delta S \rightarrow 0$ , рис. 1) чи зменшити негативні впливи між системами за рахунок трансформаційних перетворень ( $S \rightarrow \max$ , рис. 2), або фіксувати дестабілізацію в об'єкті ( $\Delta S \rightarrow \max$ , рис. 3).

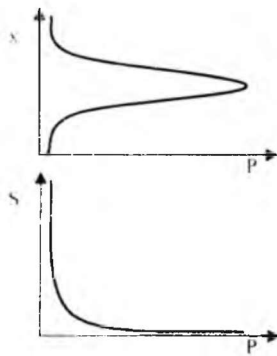


Рисунок 1

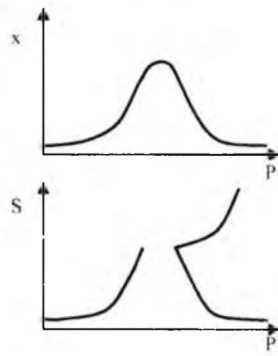


Рисунок 2

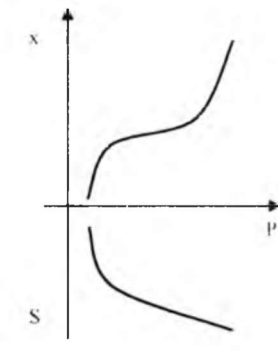


Рисунок 3

Загальний підхід у визначенні екологічності чи рівня екологічної безпеки системного об'єкта дослідження передбачає таку послідовність розв'язку задачі екологічної якості:

$$S_i \xrightarrow{A} S_j \xrightarrow{B} S_k \xrightarrow{C} S_l \xrightarrow{D} S_m \xrightarrow{E} S_n \xrightarrow{F} S_o \xrightarrow{G} S_p \xrightarrow{H} S_q \xrightarrow{I} S_r \xrightarrow{J} S_s \xrightarrow{K} S_t \xrightarrow{L} S_u \xrightarrow{M} S_v \xrightarrow{N} S_w \xrightarrow{O} S_x \xrightarrow{P} S_y \xrightarrow{Q} S_z \xrightarrow{R} S_{max} (\Delta S \rightarrow 0) \quad (1)$$

де  $S_{sw}$  – стохастичний оператор при дії природних впливів, зовнішнього регулювання в межах природоохоронних заходів;

$q(x, t)$  – зв'язок між системами, речовинно-енергетичний потік;

$A_{sw}$  – оператор переходу стохастичних функцій у детерміновані, який визначає перехід системи у новий стаціонарний стан у результаті самоорганізації;

$D_{sw}$  – детермінований оператор, який відповідає за функцію виходу, що приводить об'єкт у рівноважний екологічний стан за умови стабілізації зовнішнього і внутрішнього гомеостазу – оператор  $H_{sw}$  схеми «вхід – вихід», який для системного утворення визначається

досягненні відсутності

ймовірного комплексу стиків усіх процесів об'єкта і на реалізацію досліджень

1) еко

2) імов

Р(ΔS)

Р(ΔS)

3) риз

SIP

Risk

За

монитор

забрудн

зміни с

величин

ном рів

сті про

іRRieso

безпеки

ризик

Екс

компле

систем

викори

ландсь

вплив

зміне

результ

тоток

досягненням максимального ентропійного стану  $S_{\max_{\max}}$  і відсутністю дестабілізуючих явищ ( $\Delta S \rightarrow 0$ ).

Імовірно-ентропійний ризик підхід дозволяє у комплексній оцінці якості надати екологічну характеристику усіх трьох складових сталого розвитку, встановити процеси стабілізації і дестабілізації в аналізованих об'єктах НС, які впливають на ризик здоров'ю. Практична реалізація методології КЕС розглянуто на прикладі дослідження відповідності екологічному стану ландшафтно-геохімічних комплексів території Зміївського району, які знаходяться під впливом промислово-енергетичного комплексу.

Для оцінки процесів у складових дослідженої територіально-об'єктової системи, визначення імовірності впливу на стан екологічних компонент і негативної дії на організми і людину розраховано ризик впливу і ентропію діючого фактора у такій послідовності:

Для оцінки процесів у складових дослідженої територіально-об'єктової системи, визначення імовірності впливу на стан екологічних компонент і негативної дії на організми і людину розраховано ризик впливу і ентропію діючого фактора у такій послідовності:

$$1) P(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{length(X)-1} (X_i - \min(X))^2}{length(X)-1}} \cdot \sigma(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{length(X)-1} (X_i - 1)^2}{length(X)-1}}$$

2) імовірність стану, впливу

$$P(X, x_1, x_2) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma(X)}} \left[ \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[ \frac{1}{2} \sqrt{2} \frac{(-\max(X) - \min(X))}{\sigma(X)} \right] \cdot \frac{\pi}{2} \right. \\ \left. - \sqrt{2} \sigma(X) + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[ \frac{1}{2} \sqrt{2} \frac{(-\max(X) + \min(X))}{\sigma(X)} \right] \cdot \frac{\pi}{2} \sqrt{2} \sigma(X) \right]$$

(2)

$$P(X, x_1, x_2) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma(X)}} \left[ \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[ \frac{1}{2} \sqrt{2} \frac{(\max(X) + 1)}{\sigma(X)} \right] \cdot \frac{\pi}{2} \sqrt{2} \sigma(X) + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[ \frac{1}{2} \sqrt{2} \frac{(-\min(X) - 1)}{\sigma(X)} \right] \cdot \frac{\pi}{2} \sqrt{2} \sigma(X) \right]$$

3) ризик впливу як інформаційна ентропія і ентропія процесів впливу

$$S(P) = \ln P(X, x_1, x_2) = \log_{\text{arifm}}(X), \text{ Risk} = SI = -P(X) \cdot \ln[P(X)],$$

$$\text{Risk} = SS(X) = -PP(X) \cdot \ln[PP(X)].$$

За методологією КЕС на основі нормованих даних моніторингу забруднення території у вигляді індексу забруднення визначаються порушення екологічності і зміни системного об'єкта відповідно до розрахованої величини ентропії ( $S(P) = \log_{\text{arifm}}$ ) з подальшим аналізом рівня небезпеки за ентропійною оцінкою вірогідності процесів, що відбуваються у даному середовищі ( $RR(\text{econ}) = S1 \rightarrow PPI(X)$ ), і надається остаточна оцінка безпеки стану території за величиною екологічного ризику ( $RR_{\text{econ}}$ ).

Екологічність за наданим підходом є загальною комплексною оцінкою соціально еколого-економічної системи. Вихідними даними для її розрахунку у роботі використані дослідження екологічного стану долинних ландшафтів р. Сіверський Донець, які знаходяться під впливом дії промислово-енергетичного комплексу Зміївського району. В аналізі використані аналітичні результати контролю якості 6 постійних контрольних точок спостереження протягом 1994 – 2004 рр., що

склало з урахуванням паралельного аналізу близько 400 зразків і 10800 елемент-визначень [3].

Відповідно до умови термодинамічної рівноваги перебіг перетворень відбувається у напрямку збільшення ентропії, що обґрунтовано у вигляді матриці сполученості ентропійної оцінки стану елементів у потоці ( $S(P)$ ). Ентропійні зміни техногенних надходжень проаналізовані відповідно до даних ландшафтно-геохімічного стану території дослідження (картографічний матеріал MapInfo Professional 8.5 S/P) з врахуванням умов досягнення гомеостазу при перебігу трансформаційних змін за участю полютантів -  $\Delta S \rightarrow \max$ . Вірогідність переходу системи ґрунт з нерівноважного стану під дією техногенного потоку в стаціонарне положення контролюється властивостями геохімічного простору – типігеоморфологією ґрунту, природним складом, що контролює акумулюючу здатність до дії зовнішніх хімічних надходжень, рН середовища міграції ВМ. У сукупності надані характеристики складають умови для прояву відповідної

поведінки техногенних потоків забруднювачів, що термодинамічної природи екосистем і об'єктів НС, за запропоновано аналізувати, виходячи з ентропійною функцією (рис. 4) [4].

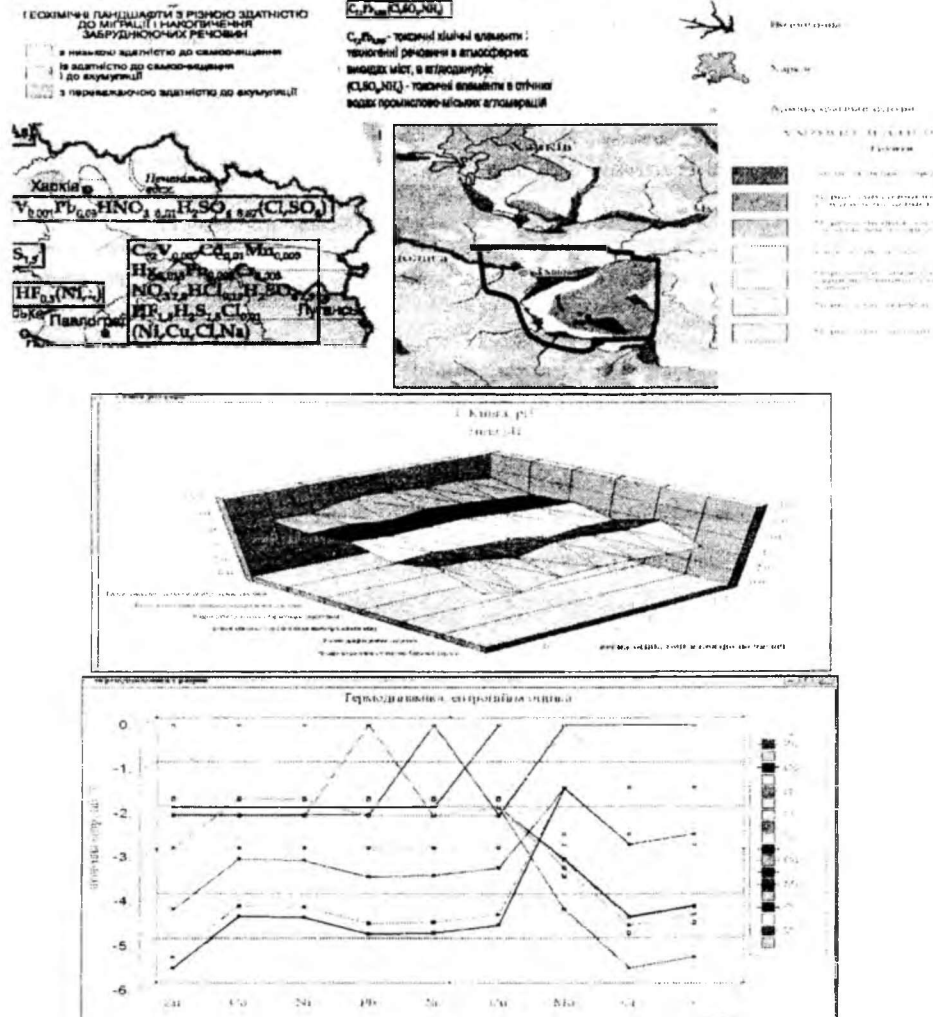


Рисунок 4 – Ентропійна оцінка стану ВМ відповідно до ландшафтно-геохімічного стану території

Комплексний екологічний ризик надано у вигляді у вигляді імовірно-ентропійної оцінки якості навколишнього середовища території у вигляді ризику небезпеки, ризику дії на складові НС, загального екологічного ризику (табл. 1). При розгляді територіально-об'єктових систем комплексна оцінка екологічності визначається ризиком

здоров'ю як відгук на усю низку пересування забруднюючої речовини в навколишньому середовищі.

Для розрахунку ризику здоров'я за даними еколого-медичного моніторингу запропоновано визначити, по-перше, фактор порушення стану організму людини – результат кластерного аналізу, по-друге, встановити

С, за

параметри еколого-гігієнічної оцінки рівня здоров'я населення за методом головних компонент.

У ході роботи проаналізовані результати кластерного аналізу за методом Ворса (виділенням кластерів за метрикою відстані Чебишева при порогових відстанях 2000, 4000, 6000, 8000 і т.д.) і за методом ближньо-

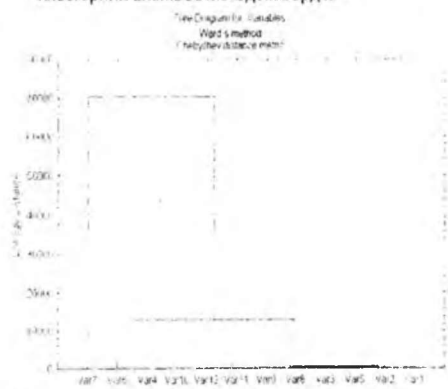
го сусіда (виділення кластерів за метрикою евклідової відстані при порогових відстанях 4000, 8000, 12000 і т.д.). Отримані групи захворювань близькі, дещо більш одноманітні кластери визначені за методом ближнього сусіда, що дозволило сформувані однорідні групи захворювань (рис. 5).

Таблиця 1 –

Результати аналізу імовірно-ентропійної оцінки ризику у ґрунтах

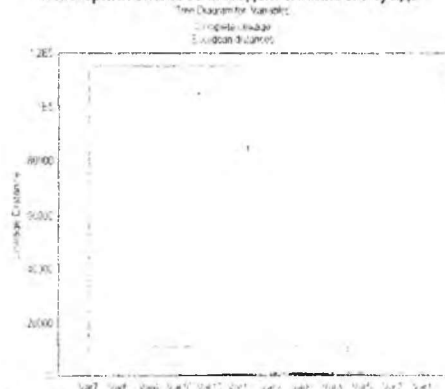
Елементи забруднення	Імовірність відхилення від $m_p$ впливу $P(X)$	Ентропійна оцінка стану ВМ у міграційному потоці ґрунту $S(P) = \log_{10} P(X)$	Ризик дії забруднюючого елемента, оцінка інформаційної ентропії $RR(ekon) = S1$	Імовірність відхилення техногенного навантаження від допустимих нормативних значень $PP(X)$	Екологічний ризик $SS(X) RR_{...}$
Стан важких металів у просторовому розповсюдженні у ґрунтах 5-10 см					
Zn	0,104	-2,267	0,235	0,545	0,331
Co	0,2	-1,611	0,322	0,581	0,316
Ni	0,199	-1,616	0,321	0,481	0,352
Pb	0,13	-2,042	0,265	0,332	0,366
Sr	0,185	-1,687	0,312	0,716	0,239
Cu	0,159	-1,842	0,292	0,308	0,363
Cr	0,071	-2,642	0,188	0,446	0,36
V	0,088	-2,435	0,213	0,28	0,356
Mo	0,231	-1,465	0,339	0,332	0,366

Кластерний аналіз за методом Вордса



Кластери: хвороби var 1, 2, 3, і 5 – зляжкісні новоутворення, захворюваність на хронічній пієлонефрит, захворюваність на камені нирок і сечоводів, захворюваність на атеросклероз; хвороби var 12, 11 і 9 – дерматомікози, короста, дизентерія; хвороби var 6 і 4 – захворюваність на гіпертонічну хворобу, хвороби органів травлення

Кластерний аналіз за методом ближнього сусіда



Кластери: хвороби var 9, 10, 11, і 12 – дизентерія; вірусний гепатит, дерматомікози, короста; хвороби var 8, 3, 5, 2 і 1 – гострі кишкові захворювання всього, захворюваність на камені нирок і сечоводів, захворюваність на атеросклероз, захворюваність на хронічній пієлонефрит, зляжкісні новоутворення; хвороби var 6 і 4 – захворюваність на гіпертонічну хворобу, хвороби органів травлення

Рисунок 2 – Аналіз даних кластерного аналізу захворюваності території дослідження

ЮЮ-  
ЛЛО-  
ИТИ,  
ИНИ  
ИТИ

Для опису усього діапазону змін властивостей захворювань беруть хвороби, що належать різним кластерам – гострі кишкові захворювання всього і хвороби органів дихання.

Таким чином, з наданого вище аналізу суттєвих ефектів у порушенні здоров'я визначено групу захворювань, за якою відповідно до методу головних компонент визначені вагомі, які є основою для еколого-гігієнічної оцінки стану техногенно-навантаженої території дослідження.

Розглянуто вісім власних чисел детермінантної матриці; відсоток варіабельності розраховано відносно

суми елементів головної діагоналі матриці, що дорівнює 8. Перші дві канонічні величини несуть 87,35 % повної варіабельності детермінантної матриці, причому на частку першої з них доводиться 75,57%. Відповідний критерій значимості показує, що для дискримінації між групами практично важливі злякакісні новоутворення, захворюваність на хронічній піелонефрит і захворюваність на гіпертонічну хворобу, що становлять 90,5% значимості оцінки наслідків екологічного стану території, врахування захворюваність на атеросклероз і камені нирок і сечоводів визначає понад 96% загального ефекту (табл. 2).

Таблиця 2 –

**Аналіз головних характеристик захворюваності для еколого-гігієнічного оцінювання**

Канонічна величина	Власне число	Частка варіабельності, %	Кумулятивна частка, %
var 1	813,81	75,57	75,57
var 2	126,85	11,78	87,35
var 6	34,12	3,17	90,51
var 5	32,00	2,97	93,49
var 3	24,35	2,26	95,75
var 4	22,47	2,09	97,83
var 7	11,78	1,09	98,93
var 8	11,55	1,07	100,00
	1076,93	100,00	

Аналіз залежності кількості населення (Var1), народжуваності (Var2) і смертності(Var3) від окремих видів захворювання показав, що кореляція цих демо-

графічних характеристик суттєва від названих вище хвороб (Var5-12) для захворювань на хронічній піелонефрит (Var6), захворюваність на атеросклероз (Var9):

Correlations (Spreadsheet1)																	
Marked correlations are significant at p < .05000																	
N=11 (Casewise deletion of missing data)																	
Variable	Var1	Var2	Var3	Var4	Var5	Var6	Var7	Var8	Var9	Var10	Var11	Var12	Var13	Var14	Var15	Var16	Var17
Var1	1,00				0,21		-0,41										
Var2		1,00			-0,11		0,41										
Var3			1,00		0,11		0,41										
Var4				1,00	-0,11		0,11		0,51		-0,51	0,21	0,31	0,41		0,31	-0,31

Остаточні результати зведені в табл. 3 і підтверджуються даними санітарних служб стосовно досліджень санітарно-гігієнічної якості даної території [5]. Оцінка ризику здоров'ю і рівень небезпеки розрахована

ний за формулами (2) і визначений відповідно до шкали, наданої в літературних джерелах [6].

Отже, ризик порушень екологічної рівноваги при наявності збільшеної кількості не задіяних у трансформаційних процесах важких металів, ідентифікованих за

іх наявність визначає Змітвіськськ здоров'ю

**Результати**

**Захворювання**

var 1 злякакі новоутренн  
var 2-хворюваність хроніч піелонфрит  
var 6-хворкність гіпертс ну хво  
var 9-захворність атеросро  
var 3-хворкністі кам нирк сечоче

малтий

їх наявності у ґрунті, оцінюється як середній ризик, що визначає вплив на стан здоров'я населення на території Зміївського району, ідентифікований у вигляді ризику здоров'ю за тією ж шкалою як критичний ризик.

Таблиця 3 –

**Результати імовірнісного ризик-аналізу на основі динаміки змін захворювання**

Захворювання	Імовірність відхилення від тип прояву P(X)	Ентропійна оцінка $S(P) = -\log_2 P$	Ризик, оцінка інформаційної ентропії Risk = S1	Оцінка ризику*
вар 1- злюккісні новоутворення	0,128	-2,052	0,26	малий
вар 2- захворюваність на хронічний пілонефрит	0,172	-1,762	0,3	середній
вар 6- захворюваність на гіпертонічну хворобу	0,164	-1,805	0,297	середній
вар 5- захворюваність на атеросклероз	0,147	-1,92	0,281	малий
вар 3- захворюваність на камені нирок и сечоводів	0,161	-1,826	0,294	середній

Примітка: \* – відповідно до [6]: 0,1-0,3 малий ризик; 0,3-0,4 - середній ризик

**ВИСНОВКИ**

Опис дослідженої території як інтегрованої системи за методологією комплексної оцінки екологічності дозволяє при визначенні рівня безпечності ситуації за результатами статичних даних вимірювання вмісту факторів порушення рівноваги у ґрунтах урахувати вірогідність хіміко-трансформаційних перетворень (статистична обробка результатів моніторингу ґрунтів, математичні моделі взаємозв'язку між характеристиками стану об'єкта), що дає підстави для надання еколого-гігієнічної оцінки з встановленням комплексного механізму регулювання якості техногенно-навантаженої території.

Дослідження питання оцінки якості НС відповідно до концепції сталого розвитку з метою формування комплексного методичного підходу з визначення екологічної небезпеки і підвищення ефективності прийняття рішення дозволило встановити:

- 1) доцільність етапності у розв'язанні задачі оцінки якості з урахуванням макро- і макrorівня аналізу:
  - визначення загального рівня екологічності дослідженого геохімічного середовища ґрунту як міграційно-трансформаційного шляху техногенних потоків;
  - оцінка відповідності навантаження нормативам якості об'єктів НС – ентропійна оцінка і ризик аналіз;
- 2) підвищення об'єктивності прийняття рішення за рахунок впровадження процесу як елементу аналітичної системи «стан - процес – стан – ризик здоров'ю».