УДК 621.396.4
DOI https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.6/06

Лисенко О.І.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Чумаченко С.М.
Національний університет харчових технологій

Новіков В.І.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гуйда О.Г.
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Турейчук А.М.
Українська військово-медична академія

Сушин І.О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОДИКА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИМОГ ДО БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ ОЦІНКИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА ТЕРИТОРІЙ РОЗПОДІЛЕНИХ ТЕХНОГЕННИХ ОБ'ЄКТІВ

Стаття присвячена розробці методичного забезпечення умов підвищення об'єктивності екологічного моніторингу наземних екологічних систем розподілених техногенних об'єктів на основі комплексного використання інформації від безпроводових сенсорних мереж про спостереження за біотичними та абіотичними факторами з урахуванням накопичення забруднення в навколишньому природному середовищі, що виникає в процесі функціонування розподілених техногенних об'єктів. У роботі конкретизовано етапи комплексної індексно-біоіндикаторної методики, яка враховує прикладну (фізичну) постановку завдання оцінки та прогнозування стану екологічної системи розподілених техногенних об'єктів.

Запропонована у статті методика обґрунтування вимог до безпроводових сенсорних мереж інформаційного забезпечення систем оцінки та прогнозування стану природного середовища територій розподілених техногенних об'єктів вказує на необхідність передбачити використання у складі безпроводових сенсорних мереж датчиків первинної інформації про стан біотичних та абіотичних факторів навколишнього природного середовища розподілених техногенних об'єктів.

Обґрунтовано, що використання безпроводових сенсорних мереж, склад сенсорів яких та їх розміщення будуть обрані на основі запропонованої методики, дадуть змогу застосувати концепцію індексно-біоіндикаторного підходу до побудови інтегральної оцінки поточного та прогнозного станів навколишнього природного середовища розподілених техногенних об'єктів і тим самим забезпечити об'єктивність, точність та достовірність цих оцінок і в результаті – сталий розвиток регіону розташування розподілених техногенних об'єктів.

Ключові слова: *безпроводова сенсорна мережа, сенсор, датчик первинної інформації, розподілений техногенний об'єкт, моніторинг навколишнього природного середовища.*

Постановка проблеми. Розподіленими техногенними об'єктами (далі – РТО) будемо називати випробувальні полігони, кар'єри, шахти, техногенні об'єкти зі значною просторовою протяжністю та прилеглими територіями (наприклад, атомні електростанції), території захоронення забруднювальних речовин, а також відходів виробництва та життєдіяльності, зони стихійного лиха [1–4].

Історично склалось так, що значна площа території України є найбільш трансформованою в результаті діяльності техногенних об'єктів. Після багаторічного техногенного навантаження на довкілля не проводились комплексні заходи щодо екологічного обстеження територій РТО за виключенням ситуацій екологічного лиха.

Доцільно зауважити, що понад 2 тис. км^2 цих земель відносяться до IBA-територій (Important Bird Area – території, важливі для існування птахів), які відіграють важливу роль для збереження видового різноманіття та кількісного багатства птахів України [5].

Відмінною рисою агресивної техногенної діяльності РТО є пріоритетність технологічно-виробничих завдань. Для результативного функціонування РТО йому потрібна територія. РТО «відбирає» її у природи шляхом переобладнання природних ландшафтів, прокладки доріг, спорудження функціональних об'єктів тощо. У процесі функціонування РТО створюється значна кількість твердих, рідких і газоподібних відходів, які забруднюють навколишнє природне середовище (далі – НПС), та різноманітні впливи, що змінюють місцевий мікроклімат, обстановку. Таким чином, РТО є потенційними джерелами забруднення НПС, які можуть призвести до забруднення як самого РТО, так й прилеглих територій.

Аналіз результатів обстеження територій РТО дає змогу зробити висновки про те, що рівень забруднення 18% від усіх РТО дуже високий, 24% – високий, 38% – середній і 20% – слабкий [3–8].

Із використанням даних щодо обсягів агресивної техногенної діяльності РТО було обраховано рівень техногенного навантаження, що здійснюють РТО на екосистему регіону розташування РТО [6–13].

Наразі системи підвищення рівня екологічної безпеки та поліпшення стану НПС РТО не дістали значного розвитку у зв'язку із тим, що не розгорнуті повноцінні системи постачання первинної інформації про стан навколишнього природного середовища РТО. Такими системами можуть бути безпроводові сенсорні мережі (далі – БСМ). У цих умовах стають актуальними розробка методів і методик формулювання вимог до БСМ, що постачають первинну інформацію для систем оцінки впливу еколого-небезпечних факторів РТО на НПС. Завдяки отриманню якісної та кількісної інформації від БСМ ці системи дадуть можливість об'єктивно, точно, достовірно й економно витрачати ресурси, виділені на природоохоронну діяльність та захист НПС від впливу РТО.

Основним ключовим недоліком чинної системи екологічного моніторингу РТО є те, що практично вся отримувана інформація є суб'єктивною й орієнтована головним чином на фактори техногенного впливу результатів функціонування РТО на стан абіотичної складової НПС, а не на екологічну оцінку стану всіх компонентів екосистеми місця розташування РТО. Натепер математичні моделі (ММ) наземних екологічних систем РТО не використовуються для оцінки стану цих екосистем. Крім того, не розроблена методика комплексної оцінки стану наземних екосистем РТО.

Зазвичай у технологічному процесі РТО використовуються техногенно-агресивні техніка та технології, що сприяють виникненню біля 80 видів специфічних забруднень [9–16]. Для подальшого аналізу кількісні характеристики цих речовин були розподілені за класами небезпеки (табл. 1).

Таблиця 1

Кількісні характеристики забруднювальних речовин за середовищами

Вид середовища	**Кількість інгредієнтів забруднення**	**Кількість інгредієнтів забруднення за класами небезпеки**			
Класи небезпеки		1	2	3	4
Атмосферне повітря (A)	84	21	30	21	12
Поверхневі води (L^p)	73	11	29	22	11
Ґрунтові води (L^g)	73	11	29	22	11
Ґрунт (G)	62	22	17	14	9

Визначення кількісних параметрів забруднення відбувається шляхом вимірювання за допомогою відповідного обладнання або біоіндикаторів. Виникає завдання створення сенсорної мережі для отримання необхідної інформації.

Підсумок аналізу забезпечення систем екологічного моніторингу РТО датчиками первинної інформації про рівень та склад забруднень свідчить про неможливість виконання ефективного спостереження та контролю без використання БСМ [13–21]. Основними проблемами інформаційного забезпечення екологічного моніторингу слід вважати:

1. Неможливість оперативного визначення всіх інгредієнтів забруднення екосистем РТО через відсутність відповідного обладнання;

2. Наявні системи екологічного моніторингу орієнтовані на виявлення випадків виходу забруднення за межі санітарно-захисної зони РТО. Тобто

спостереження за забрудненням екосистем відбувається на межі РТО з прилеглою територією (зовнішній периметр). Стан внутрішніх наземних екосистем РТО майже не контролюється;

3. Заміри параметрів забруднення наземних екосистем РТО виконуються нерегулярно, необхідна для оцінки та прогнозування точність замірів досі не досліджувалась;

4. Для спостереження за станом наземних екосистем РТО не використовуються біологічні індикатори;

5. Відсутня методика оцінки інтегрального забруднення стану наземних екосистем РТО.

Викладене вище дає змогу зробити висновок, що питання організації ефективного екологічного моніторингу РТО є актуальним. Але вирішенню цього питання перешкоджає ряд причин, основною з яких є відсутність методики оцінки та прогнозування змін стану наземної екосистеми РТО – основної складової екологічного моніторингу. Це вимагає проведення додаткових досліджень щодо створення системи комплексної оцінки і прогнозування впливу процесу функціонування РТО на екосистему регіону. Також унаслідок відсутності відповідних методик виникає завдання розробки специфічної методики оцінки та прогнозування стану наземних екологічних систем РТО. Подальший зміст статті присвячено викладенню методики оцінки та прогнозування стану наземних екологічних систем, ускладнених техногенним навантаженням територій розподілених техногенних об'єктів, яка дає змогу обґрунтувати вимоги до безпроводових сенсорних мереж інформаційного забезпечення систем оцінки та прогнозування стану природного середовища територій розподілених техногенних об'єктів.

Постановка завдання дослідження. На сьогодні відсутні методики, які можуть адаптувати наявні методи до рівня, що гарантує оцінку та прогнозування стану екосистем розподілених техногенних об'єктів із необхідною об'єктивністю; дають змогу здійснити вибір та комплектування засобів контролю (спостереження, вимірювання); комплексного оцінювання та прогнозування стану наземних екосистем РТО, які перебувають під специфічним впливом процесу функціонування цих РТО. У більшості випадків оцінка та прогнозування стану екосистем техногенних об'єктів носить якісний характер і базується на суб'єктивних враженнях особи служби екологічної безпеки РТО.

Мета статті – методичне забезпечення умов підвищення об'єктивності екологічного моніторингу наземних екологічних систем РТО на основі комплексного використання інформації від БСМ про спостереження за біотичними та абіотичними факторами з урахуванням накопичення забруднення в НПС, що виникає в процесі функціонування РТО. Для РТО це дасть науково обґрунтовані дані для розрахунку допустимої інтенсивності його діяльності.

В екологічних дослідженнях **об'єктивність** екологічного моніторингу тлумачать як незалежність оцінки та прогнозування стану наземних екосистем РТО від суб'єкту, який виконує спостереження, тобто сприйняття досліджуваного об'єкту або процесу так, як вони дійсно існують. Об'єктивність дає змогу зробити висновок відповідно до зібраного матеріалу, не зважаючи на те, чи збігаються ці висновки із загальноприйнятими поняттями, навичками, мораллю або добрим тоном, із попередніми авторами та поглядами визначних авторитетів із вказаного питання [1–13]. Це може бути досягнуто завдяки розгортанню БСМ за рахунок:

– приладових (об'єктивних) вимірів рівня забруднення;

– обґрунтованих у системній екології контактних способах вимірювання та наступних оцінки й прогнозування стану НПС;

– строгого використання математичного апарата теорії ідентифікації систем (їхньої структури та параметрів), оцінки та прогнозування стану цих систем.

Для реалізації комплексної оцінки та прогнозування впливу техногенної діяльності на стан екосистеми РТО пропонується застосувати метод декомпозиції з використанням імітаційного моделювання та інформаційного забезпечення алгоритмів моніторингу, що отримується від спеціально розгорнутої під конкретний РТО безпроводової сенсорної мережі [1–12].

Для досягнення мети статті необхідно вирішити вказані нижче завдання:

1. Провести аналіз джерел багатокомпонентного забруднення екосистеми РТО.

2. Визначити розподіл забруднювальних речовин на території екосистеми РТО взагалі і на функціональних об'єктах зокрема.

3. Провести аналіз наявних методик оцінки та прогнозування стану екосистем РТО.

4. Розробити процедуру визначення складу вектору забруднення наземних екосистем РТО.

5. Розробити алгоритм вибору датчиків (сенсорів) первинної інформації (ДПІ) для використання в сенсорній мережі.

6. Провести аналіз, пошук та обґрунтування технічної реалізовності такого вектору спостереження, який забезпечує спостережуваність наземної екосистеми у розумінні виконання критеріїв спостережуваності – тобто необхідно розв'язати задачу спостережуваності системи з урахуванням технічних можливостей формування вектору спостережень.

7. Побудувати такий алгоритм обробки вектору спостережень, що забезпечує отримання оцінки всього вектору стану наземної екосистеми.

8. Виконати агрегування біологічних компонентів наземних екосистем та вибір математичної моделі її функціонування.

9. Створити математичну модель спостерігача наземної екосистеми РТО з урахуванням техногенного впливу його функціонування.

10. Моделювання впливу забруднення на стан екосистеми відбувається через параметри математичної моделі, які залежать від узагальненого показника забруднення – індексу забруднення.

11. Розробити методику, що дає змогу комплексувати різноманітну інформацію для вирішення завдання оцінки та прогнозування стану наземних екосистем РТО.

12. Створити модель оцінки та прогнозування стану наземних екосистем функціональних об'єктів РТО з високою та низькою інтенсивністю екологічного впливу.

13. Створити модель оцінки та прогнозування стану екосистеми, вільної від впливу РТО (модель еталонної екологічної зони).

14. Виконати математичне моделювання стану наземних екосистем об'єктів РТО з урахуванням факторів його функціонування, погодно-кліматичних умов та відновлювальних (реабілітаційних) факторів.

15. Провести прогнозування стану наземних екосистем РТО з урахуванням реальних планів його використання.

16. Провести експериментальні дослідження стану екосистем РТО.

Виклад основного матеріалу дослідження: методики обґрунтування вимог до безпроводових сенсорних мереж інформаційного забезпечення систем оцінки та прогнозування стану природного середовища територій розподілених техногенних об'єктів.

Враховуючи прикладну (фізичну) постановку завдання оцінки та прогнозування стану екологічної системи РТО [13] і наведені вимоги та рекомендації, конкретизуємо етапи комплексної індексно-біоіндикаторної методики:

1. Вивчення та визначення екологічних параметрів РТО.

2. Функціональне зонування РТО.

3. Концептуалізація структури спостереження.

4. Специфікація компонентів, що вимірюються, інвентаризація екологічних аномалій.

5. Планування експериментальних досліджень.

6. Вибір типів датчиків первинної інформації (ДПІ) або, як ще кажуть, сенсорів.

7. Побудова графіка (циклограми) спостережень (вимірювань) всередині полігону, погоджених із спостереженнями (вимірюваннями) ззовні РТО .

8. Побудова та перевірка моделі (сценарію) спостережень (вимірювань).

9. Безпосереднє спостереження за динамікою екосистеми.

10. Дослідження системи первинного інформаційного забезпечення на моделі.

11. Оптимізація (вибір) структури та параметрів системи спостереження за станом екосистеми РТО.

12. Заключний етап: синтез системи спостереження (етап прийняття рішень).

13. Оцінка стану екосистеми РТО.

14. Прогнозування стану екосистеми РТО.

Розкриємо зміст кожного етапу методики.

1. Вивчення та визначення екологічних параметрів РТО. **Екосистема РТО** – складний, багаторежимний, динамічний із різним темпом розвитку процесів, еволюціонуючий об'єкт, для всебічного вивчення якого потрібні значні матеріально-технічні та людські ресурси впродовж тривалого періоду.

Ключову роль у вивченні екосистеми РТО та управління її станом відіграє первинна інформація щодо параметрів РТО: фізико-географічних характеристик РТО; кліматичних умов; соціо-еколого-економічної обстановки у регіоні розташування РТО, наявності, рівня та ступеню реалізації регіональних програм екологічного моніторингу та природоохоронної діяльності; ретроспективного аналізу екологічних проблем РТО, даних щодо накопичених забруднень; планів розвитку (планованої інтенсивності забруднення функціональних об'єктів в процесі функціонування).

Одним із основних етапів вивчення параметрів РТО є виконання екологічної паспортизації РТО. На основі даних, зібраних у процесі екологічної паспортизації окремих об'єктів РТО, створюються екологічні формуляри, які входять до загального формуляру РТО.

2. Функціональне зонування РТО. З урахуванням усієї складності та цілісності екосистеми для вирішення завдання охорони, раціонального використання, управління екосистемою РТО та прогнозування її реакції на антропогенний вплив необхідно здійснити просторову декомпозицію РТО – функціональне зонування РТО. Тому структурно зонування РТО відбувається як територіальне зонування на функціональні об'єкти, мезоекосистеми (підсистеми єдиної екосистеми) РТО, зони поширення та накопичення забруднень, зовнішні та внутрішні санітарні зони (якщо такі є). Робота РТО зазвичай організована таким чином, що певні види випробувальної та допоміжної діяльності, як і засоби та елементи інфраструктури, які спрямовані на її забезпечення, закономірно і постійно, або принаймні протягом довгого часу, зосереджені на певних частинах його території. Відповідно, і наслідки функціонування складових РТО не поширюються рівномірно по всій території, а локалізуються на певних його ділянках – окремих функціональних зонах.

Функціональні зони – це окремі складові РТО, які призначені, виділені та спеціально обладнані для забезпечення основних і допоміжних видів діяльності людини. Функціональне зонування, яке відображене на відповідній карті, складає один із основних результатів комплексного екологічного дослідження території РТО.

Карта функціонального зонування РТО містить інформацію про всі функціональні об'єкти, чутливі ділянки екосистем та відповідні обмеження, пов'язані із функціонуванням РТО.

Практична реалізація функціонального зонування РТО дає змогу забезпечити ефективне використання фінансових, матеріальних, технічних, інформаційних та екологічних ресурсів під час вирішення завдань управління станом його екосистеми.

3. Концептуалізація структури спостереження складається з біологічного і технічного аспектів. Для реалізації біологічного аспекту цього етапу методики необхідно виділити в мезоекосистемах РТО кінцеве число властивостей та процесів, які, з точки зору спеціалістів із системної екології, найбільш суттєві для вирішення завдання спостереження, прогнозу та управління станом екосистеми РТО.

Технічний аспект концептуалізації спостереження полягає в обмеженні та конкретизації напрямків вивчення стану екосистеми й виборі технічних (апаратних) і алгоритмічних засобів (обробки інформації, що від них надходить).

Концептуалізація спостереження починається з виділення зовнішніх щодо екосистеми РТО зв'язків (впливів), які підлягають контролю (вимірюванню) (див. рис. 1).

Потім на основі концепції збереження речовини та енергії (дотримання балансових відношень) будується концептуальна модель спостереження на якісному рівні (або сценарій спостереження) за станом мезоекосистем РТО. Визначається місце мезоекосистем у загальному ландшафті РТО як системи більш високого рівня ієрархії. Встановлюються входи та виходи, що підлягають контролю (вимірюванню, обчисленню або алгоритмічному вимірюванню), зв'язки з сусідніми мезоекосистемами РТО. Функціонуванням (поведінкою) окремої наземної екосистеми (мезоекосистеми) РТО називаємо процес зміни властивостей її елементів у часі в результаті реакції на дію зовнішніх факторів та взаємодію між внутрішніми складовими екосистеми (див. рис. 2).

Внутрішній склад наземної мезоекосистеми РТО утворюють такі агреговані складові: приземний шар повітря; фітоценоз (рослинна спільнота); зооценоз (тваринний світ); мікробний світ; ґрунт; порода, що утворює ґрунт; ґрунтові води.

Між агрегатами наземної екосистеми існують речовинно-енергетичні та інформаційні зв'язки, які піддаються зовнішнім впливам. Комплекс зовнішніх зв'язків та внутрішніх впливів необхідно контролювати за допомогою технічних та біотичних (біоіндикатори, біосенсори) ДПІ. На початковій стадії розробки системи первинного інформаційного забезпечення концептуальна

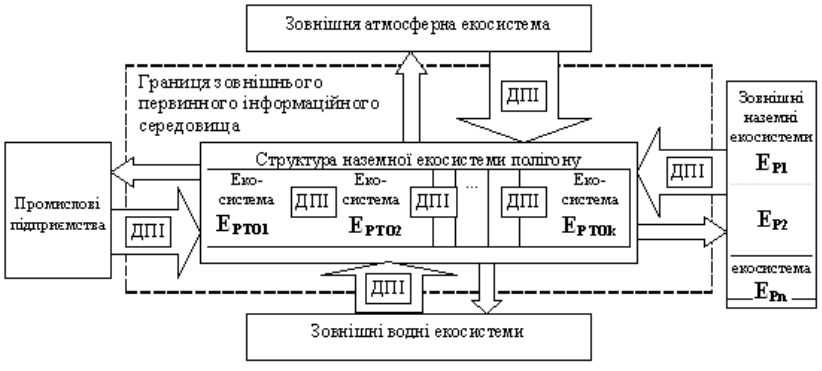

Рис. 1. Структура основних зовнішніх зв'язків (матеріальних, енергетичних, інформаційних потоків): E_{PTO1}, E_{PTO2}, …, E_{PTOk} – складові наземної екосистеми РТО

модель вимірювань будується на якісному рівні. Тоді ж надається словесний опис часової динаміки стану складових мезоекосистеми полігону та її взаємодії з зовнішніми системами.

Рішення про те, які саме компоненти мезоекосистеми РТО достатні для однозначного тлумачення процесу зміни в часі стану екосистеми РТО загалом, приймають спеціалісти з системної екології. Обраний ними рівень агрегування є вихідною інформацією для початку розробки (проєктування) концептуальної моделі інформаційного забезпечення алгоритмів первинної обробки інформації (діагностики стану наземних екологічних систем).

Структура наземної мезоекосистеми полігону (рис. 2) є високоагрегованою та може бути віднесена до класу грубих (якісних) структур. Наразі, за рекомендаціями, припускається розглядати вузькі угрупування популяцій, які виділяються за токсономічною, просторовою (наприклад, із урахуванням ярусності), трофічною або іншими ознаками. Поряд із ґрунтом у якості самостійної мініекосистеми РТО, що служить для оцінки екосистеми, рекомендується використовувати підстилаючу поверхню. Необхідно зазначити, що кожний елемент узагальненої структури (рис. 2) насправді сам є підсистемою, тобто системою, яка стоїть на ступінь нижче у загальній ієрархічній структурі системної екології РТО. Популяції рослин, тварин, мікроорганізмів необхідно виділяти як елементи підсистем фітоценозу, тваринного світу або мікробного співтовариства відповідно і водночас вирішувати завдання внутрішнього та зовнішнього інформаційного забезпечення підсистем. Для аналізу екологічного стану РТО пропонується використовувати рівень агрегування, що обмежується популяцією осіб конкретного виду, які беруть участь у функціонуванні цієї екосистеми. Але, враховуючи високу кількість видів наземних мезоекосистем РТО (особливо це стосується безхребетних тварин і мікроорганізмів) та неточності інформації щодо кількісних показників функціонування багатьох видів, під час описування екосистем рекомендується використовувати групи популяцій, які називаються функціональними або трофічними групами (або гільдіями). У цих групах агрегуються популяції декількох подібних за певними ознаками видів, загальна чисельність яких піддається більш точному вимірюванню та може служити основою для подальшої обробки у системі моніторингу та управління навколишнім природним сесредовищем.

4. Специфікація компонентів, що вимірюються, інвентаризація екологічних аномалій. Призначення цього етапу методики полягає в тому, що для кожного функціонального об'єкту зі складу РТО необхідно:

− визначити склад множини вхідних змінних та змінних стану математичної моделі екосистеми;

− задати структуру математичної моделі перетворення вхідних змінних у вихідні та вектор спостережень.

Натепер основу структури динамічних моделей екосистем з «n» змінними стану складає «n» диференціальних (різницевих) рівнянь, які виражають закон зміни кожної із змінних у часі із урахуванням статичних обмежень у формі рівностей або нерівностей.

Особлива увага приділяється властивостям екосистеми, що вимірюються, погодженню прийомів та технологій використання біоіндикаторів і біосенсорів у сполученні з технічними ДПІ.

5. Планування експериментальних досліджень. За результатами специфікації та з огляду на концептуальну структуру спостережень плануються спостереження за динамікою властивостей екосистеми та середовища, що вивчаються (вхідні та вихідні змінні екосистеми, вектор стану).

6. Вибір типів ДПІ. Основне завдання цього етапу полягає в такому виборі датчиків первинної інформації, які забезпечать вимірювання (контроль) усього комплексу зовнішніх впливів та внутрішніх зв'язків (пункт 3 методики), дадуть змогу контролювати поширення забруднень на території РТО та за його межі. Обов'язковою умовою є саме можливість

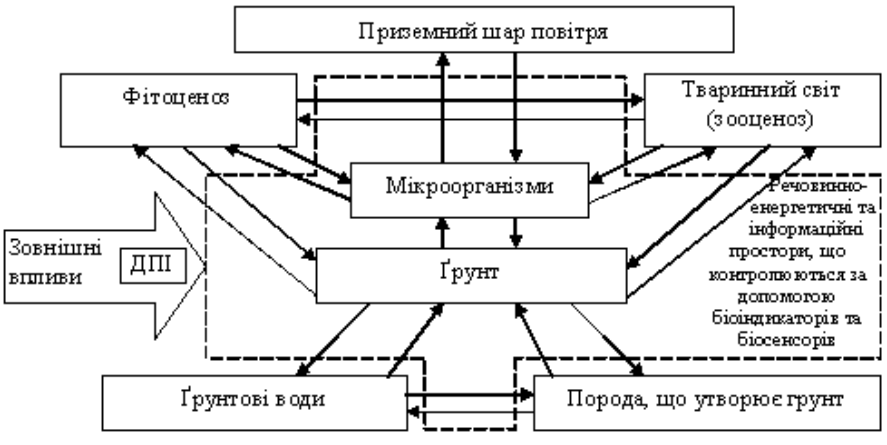

Рис. 2. Узагальнена внутрішня структура наземної екосистеми РТО

його контролювати. Водночас необхідно приділити увагу мобільності обраних ДПІ, що впливатиме на оперативність контролю стану НПС.

7. Побудова графіка (циклограми) спостережень (вимірювань) усередині РТО, погоджених зі спостереженнями (вимірюваннями) ззовні РТО. Поняття вимірювань (спостережень) всередині та ззовні РТО відображає факт просторового розташування місць, у яких виконуються відповідні виміри. Необхідність узгодженості системи спостереження за локальною екосистемою РТО, що входить до складу регіональної екосистеми, пояснюється відкритістю локальних систем для енергоресурсної та інформаційної взаємодії (обміну) з зовнішніми системами (рис. 1).

Зовнішніми будемо вважати вимірювання, що проводяться на зовнішній межі санітарної зони (рис. 3). Вони складаються із замірів, що виконуються за допомогою ДПІ та спостережень за міграцією тварин.

Внутрішніми будемо вважати всі вимірювання, що виконуються у внутрішніх точках РТО (внутрішній межі санітарної зони, функціонального об'єкту, мезоекосистеми РТО).

Вимірювання на внутрішній і зовнішній межах санітарної зони дають змогу з'ясувати просторовий градієнт забруднення та його зміну у часі, тобто зробити висновок щодо виходу забруднень із санітарної зони РТО у зовнішні екосистеми або навпаки. Аналогічні висновки можуть бути отримані і для внутрішніх умовних санітарних зон між навчальними об'єктами та мезоекосистемами полігону. Спостереження за міграцією тварин та птахів крізь санітарну зону РТО та всередині РТО служать об'єктивною біотичною інформацією щодо стану екосистем РТО.

Для обчислення просторового градієнту необхідно заміри виконувати в той самий момент часу, але в різних пунктах. Проте через велике число точок замірів доцільно проводити їх або збирати проби за допомогою мобільних засобів на протязі малого відрізку часу.

Для обчислення швидкості зміни в часі забруднення, що осіло на поверхню землі, необхідно обрати інтервал часу, достатній для того, щоб тенденція виявилася на фоні випадкових флуктуацій. Для РТО (як показує досвід) достатньо проводити заміри через кожні 3–7 днів.

8. Побудова та перевірка моделі (сценарію) спостережень (вимірювань). Після усвідомлення складу вектору стану екологічної системи та структури спостережень (вимірювань) і складу комплекту ДПІ (апаратних та біотичних) оцінюються апаратно-алгоритмічні та екосистемні можливості щодо ідентифікації параметрів математичної моделі екосистеми та спостереження

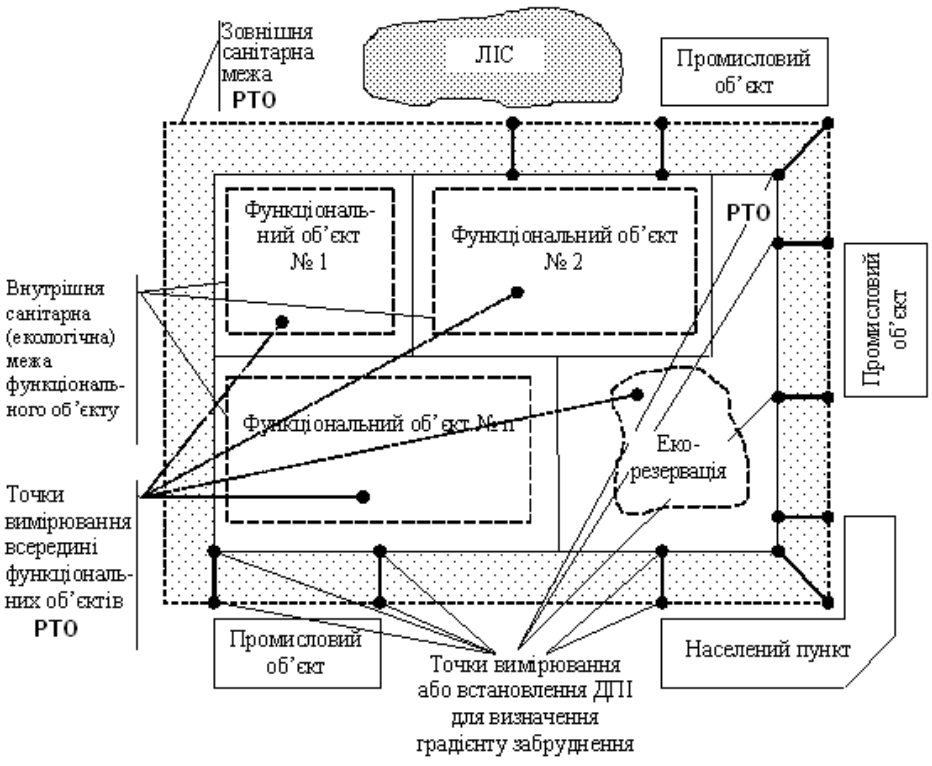

Рис. 3. Структурна схема екосистеми РТО

за вектором її стану. Здійснюється вибір територіально-просторового розташування технічних ДПІ та пунктів спостереження за біоіндикаторами. Розробляються сценарії (циклограми) спостережень та алгоритми їх зміни, які придатні для наступного аналізу альтернатив.

Можливі три основних типи сценаріїв спостережень (вимірювань):

a. синхронний;
b. асинхронний;
c. комбінований.

Суть **синхронного сценарію** спостереження (вимірювання) полягає в тому, що спостереження (вимірювання) в усіх точках просторового (у випадку використання дистанційних засобів зондування) або об'єктового розташування ДПІ та біоспостерігачів відбувається строго відповідно до заданого часу, за такої умови можна використовувати синхронний одномоментний та синхронний різномоментний спосіб спостереження (вимірювань).

Асинхронний сценарій спостереження (вимірювання) полягає у тому, що спостереження та (або) вимірювання в певних пунктах РТО виконуються не в задані моменти часу, а за найбільш зручних зовнішніх умов, але місце спостереження (вимірювання) чітко фіксується (наприклад, заміри у місцях екологічних аномалій, епіцентрах природних та техногенних збурень).

Комбінований сценарій об'єднує позитивні якості синхронних та асинхронних способів спостереження (вимірювання) і дає змогу отримати загалом найкращий результат щодо ефективності вимірювань.

9. Безпосереднє спостереження за динамікою екосистеми. Відповідно до плану експериментальних досліджень, розроблених циклограм та сценарію спостережень (вимірювань) за допомогою обраних ДПІ проводиться спостереження за динамікою екосистеми (вимірювання визначених параметрів). На цьому етапі визначаються показники компонентів наземної екосистеми – біомаса продуцентів, субстратів та консументів, уточнюється погодно-кліматичний вплив (дані метеорологічних служб). Результати спостережень (вимірювань) включаються до інтерактивної процедури уточнення концептуальної структури спостереження, а також використовуються в алгоритмах ідентифікації та верифікації (перевірки на адекватність) математичної моделі екосистеми РТО.

10. Дослідження системи первинного інформаційного забезпечення на моделі. Складається з двох підетапів:

а) перевірка адекватності математичної моделі опису поведінки екосистеми РТО та системи спостереження;

б) дослідження системних властивостей математичної моделі спостереження за вектором стану екосистем РТО.

Під час перевірки адекватності математичної моделі екосистеми РТО аналізуються прогностичні можливості моделі, з'ясовується, наскільки модель здатна відтворювати поведінку вектору стану системи-оригіналу.

Відповідно до методу системної динаміки остаточну відповідь щодо повної придатності математичної моделі не можна отримати ніколи, оскільки неможливо порівняти нескінченне число результатів моделювання з нескінченним числом експериментів як у сенсі континуальної нескінченності (тобто в кожній точці обмеженого інтервалу), так і концептуальної (тобто в сенсі нескінченної тривалості прогнозу навіть у дискретних точках). Проте практичний висновок можна зробити з частковою впевненістю з деякого об'єму співставлення результатів експериментів із результатами моделювання; водночас можливо використовувати математичну модель екосистеми в адаптивному режимі (режимі самонастроювання на знову отримані вимірювання).

Відповідно до наявних методик відомості, достатні для оцінки рівня адекватності динамічної моделі, можуть бути отримані з обмеженого об'єму попередньої інформації на підставі порівняння розрахованих (модельних) значень динаміки змінних стану ММ екосистеми РТО $X(t_i)$ та (або) вихідних координат $Y(t_i)$ в моменти часу $t_i \in [t_0, t_f]$, $i \in \{0,1,\ldots,N\}$ із експериментальними даними. За гарного збігу розрахункових та експериментальних значень у відповідні моменти часу (для кількісної оцінки ступеню збігу застосовуються різні чисельні міри та статистичні показники) вважається, що результати моделі не суперечать спостереженням і таким чином відсутня основа для перегляду структури або параметрів моделі. Якщо збіг незадовільний, тоді здійснюється повернення до етапу ідентифікації для уточнення математичної моделі.

Найбільш часто наразі для оцінки адекватності математичної моделі об'єкту-оригіналу використовуються такі ознаки збігу результатів моделювання з емпіричними даними:

- кількість точок екстремумів;
- розподіл точок екстремумів у часі;
- знак приросту екстремумів у часі;
- синфазність виникнення коливань та їхньої амплітуди;

− тренди (середні значення змінних приблизно збігаються, помилка прогнозування в контрольних точках утворює процес, близький до дискретного білого шуму з мінімальною дисперсією);

− одночасність досягання екстремальних значень для різних змінних;

− реакція на відомі зондувальні (типові) впливи.

За рахунок багатокрокової процедури уточнення структури та параметрів математичної моделі необхідно добитися практично прийнятного результату та перейти до наступного підетапу.

Процес дослідження системних властивостей математичної моделі спостереження за вектором стану екосистеми РТО включає такі кроки:

− вивчення загальних рис поведінки траєкторії $\hat{X}(t)$, $t \in [t_0, t_f]$ за типових збурень (існування та єдиність, обмеженість, періодичність, стійкість процесу на виході математичної моделі спостерігача стану екосистеми РТО);

− вивчення залежності рішення задачі спостереження від початкового стану (нульового наближення до оцінки стану екосистеми), структури математичної моделі екосистеми РТО та вектору вимірювань;

− вивчення чутливості процесу спостереження до неточності завдання параметрів спостерігача стану екосистеми РТО.

11. Оптимізація (вибір найкращого варіанту) структури та параметрів системи спостереження за станом екосистеми РТО. Показниками якості функціонування системи спостереження є повнота та точність інформації; надійність; оперативність і вартість.

У якості параметрів структури математичної моделі системи спостереження за вектором стану екосистеми РТО, які оптимізуються, використовуються розмірність та тип (лінійні або нелінійні) рівнянь, що описують вхід-вихідні співвідношення.

У якості параметрів апаратних засобів спостереження розглядаються такі: тип ДПІ та характеристики точності; кількість ДПІ та їх просторове розміщення; вартість; мобільність; інтервали часу опитування; вид отримуваної інформації; оперативність комп'ютерно-алгоритмічної обробки результатів спостереження.

12. Заключний синтез системи спостереження (етап прийняття рішення). Етап оптимізації структури та параметрів дає змогу побудувати інтерактивні процедури розробки структури моделей-претендентів, підібрати найкращі значення показника якості для цих моделей на заданих класах структур, автоматизувати процес вибору найкращої моделі. Проте за своїм змістом завдання вибору ДПІ для системи первинної обробки інформації щодо стану екосистеми є багатокритеріальною та комплексною. Для прийняття рішення щодо вибору структури та параметрів ДПІ необхідно багаторазово повертатися до процедури оптимізації та залучати додаткову інформацію.

13. Оцінка стану екосистеми РТО. На основі отриманих результатів спостережень (етап 9 методики) та даних уражаючого впливу процесу функціонування РТО розраховується узагальнений індекс забруднення, з'ясовується відновлювальний вплив природоохоронних заходів (природних та штучних). Після цього уточнюються параметри математичної моделі екосистеми РТО. На основі отриманих результатів проводиться оцінка стану наземної екосистеми РТО.

Для оцінки загального стану РТО визначається найбільш чутливий до впливів елемент екосистеми. Оцінка його стану характеризує загальний стан екосистеми. Визначення чутливого елементу проводиться шляхом побудови спеціалістами системної екології орграфів трофічної багаторівневої структури.

14. Прогнозування стану екосистеми РТО. Із використанням отриманих у пункті 13 вказаної методики результатів проводиться прогнозування стану наземної екосистеми РТО на термін до 10 років. Отримані дані використовуються для корекції планів функціонування РТО з метою зменшення техногенного навантаження та планування відновлювальних (реабілітаційних) і природоохоронних заходів.

У цьому підрозділі детально розглянуто етапи методики оцінки та прогнозування стану наземних екосистем РТО. Виконання етапів згаданої методики дає можливість отримати інформацію щодо поточного стану наземної екологічної системи РТО та спрогнозувати розвиток ситуації з урахуванням інтенсивності функціонування РТО та відновлювальних (реабілітаційних) заходів.

Висновки

1. Проведений загальний аналіз функціонування розподілених техногенних об'єктів (РТО) виявив високу потенційну загрозу впливу їхніх технологічних циклів на навколишнє природне середовище (НПС).

2. Аналіз стану системи екологічного моніторингу РТО виявив такі суттєві недоліки:

− методики оцінки та прогнозування стану НПС, що використовуються натепер, непристосовані для РТО, які характеризуються специфічним, заздалегідь спланованим або випадковим імпульсним техногенним впливом;

– оцінювання стану довкілля РТО проводиться головним чином шляхом контролювання техногенного впливу агресивної техногенної діяльності, а фактичний стан НПС майже не досліджується;

– відсутня система постійного спостереження за станом НПС. Спостереження починається лише у випадках виникнення надзвичайних ситуацій;

– для спостереження за якістю НПС застосовуються лише технічне обладнання і не використовується метод біоіндикації;

– у системі екологічного моніторингу НПС РТО відсутня всеохоплююча первинна різнорідна інформація, яка може бути отримана від безпроводових сенсорних мереж.

3. Запропонована у статті методика обґрунтування вимог до безпроводових сенсорних мереж інформаційного забезпечення систем оцінки та прогнозування стану природного середовища територій розподілених техногенних об'єктів вказує на необхідність передбачити використання у складі БСМ датчиків первинної інформації про стан біотичних та абіотичних факторів НПС РТО.

4. Використання БСМ, склад сенсорів якої та їх розміщення будуть обґрунтовані на основі запропонованої методики, дадуть можливість застосувати концепцію індексно-біоіндикаторного підходу до побудови інтегральної оцінки поточного та прогнозного станів НПС РТО і тим самим забезпечити об'єктивність, точність та достовірність цих оцінок і врешті – сталий розвиток регіону розташування РТО, тобто завдяки використанню БСМ зробити ці РТО «зеленими».

Список літератури:

1. Агробіорізноманіття України: Теорія, методологія, індикатори, приклади. Книга 1 / За редакцією О.О. Созінова, В.І. Придатка. Київ : ЗАТ «Нічлава», 2005. 384 с.

2. Романченко І.С., Сбітнєв А.І., Бутенко С.Г. Екологічна безпека: екологічний стан та методи його моніторингу. Київ : «Полісся», 2006. 560 с.

3. Качинський А.Б. Екологічна безпека України: системний аналіз перспектив покращення. Київ : НІСД, 2001. 312 с. Сер. «Екологічна безпека». Вип. 5.

4. Методологічні підходи до створення бази даних для системи керування станом навколишнього середовища в Збройних Силах України / І.С. Романченко, А.І. Сбітнєв, С.М. Чумаченко, В.А. Слободяник. *Наука і оборона.* 2003. № 3. С. 50–56.

5. Дудкін О.В., Микитюк О.Ю. Національна доповідь про стан ІВА територій України / Українське товариство охорони птахів. Київ, 2001 р. 32 с.

6. Збереження і невиснажливе використання біорізноманіття України: стан та перспективи. / Під ред. Ю.Р. Шеляг-Сосонко. Київ : Хімджест, 2003. 246 с.

7. Збереження біорізноманіття України. Друга Національна доповідь. / Під ред. Я.І. Мовчана, Ю.Р. Шеляг-Сосонко. Київ : Хімджест, 2003. 110 с.

8. Галченко Ю.П. Методические подходы к оценке техногенного воздействия через изменение компонентов экосистем. *Экологические системы и приборы.* № 1. 2003. С. 29–37.

9. Данилишин Б.М., Ковтун В.В., Степаненко А.В. Наукові основи прогнозування природно-техногенної (екологічної) безпеки : монографія. Київ : Лекс Дім, 2004. 552 с.

10. Кучерявий В.П. Екологія. Львів : Світ, 2000. 500 с.

11. Математическая постановка задачи оптимального управления экологическим состоянием техногенно нагружаемых территорий. / А.И. Лысенко, С.Н. Чумаченко, И.В. Чеканова, А.Н. Турейчук. *Адаптивні системи автоматичного управління.* Міжвідомчий науково-технічний збірник. Вип. 5(25). Дніпропетровськ : Системні технології, 2002. С. 45–55.

12. Використання спостерігача Льюінбергера для оцінки та прогнозування стану ускладненої агроекосистеми із застосуванням математичного та комп'ютерного імітаційного моделювання / О.І. Лисенко, С.М. Чумаченко, І.В. Чеканова, А.М. Турейчук. *Агробіорізноманіття України: теорія, методологія, індикатори, приклади.* Книга 2. Київ : ЗАТ «Нічлава», 2005. С. 86–139.

13. EXPERT-MODELINGDECISIONSUPPORTSYSTEMFORTHEDEPLOYMENTANDMANAGEMENT OF A WIRELESS SENSOR NETWORK WITH MOBILE SENSORS AND TELECOMMUNICATION AIR PLATFORMS IN THE EMERGENCY ZONE SECURITY FORUM 2021 / Olexander Lysenko, Olena Tachinina, Valeriy Novikov, Iryna Alekseeva, Serhii Chumachenko, Andrii Tureichuk. 14th Annual International Scientific Conference February 10th, 2021 at Matej Bel University in Banská Bystrica, Slovakia Conference Proceedings Banská Bystrica, Slovakia, 2021. С. 249–258.

14. Принципи моделювання та прогнозування в екології / В.В. Богобоящий, К.Р. Курбанов, П.Б. Палій, В.М. Шмандій. Київ : Центр навчальної літератури, 2004. 216 с.

15. Лысенко А.И., Чумаченко С.Н., Турейчук А.Н. Комплексная оценка и прогнозирование состояния экосистемы техногенно-нагружаемой территории с применением балансовых уравнений и наблюдателя

Льюинбергера / Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 6(35). Дніпропетровськ, 2004. С. 139–147.

16. Турейчук А.М. Місце сучасних програмних продуктів у забезпеченні екологічної безпеки техногенно-небезпечних видів діяльності. Нові технології. *Науковий вісник Інституту економіки та нових технологій ім. Кравченка.* Вип. 1(2). Кременчук, 2003. С. 66–59.

17. Intelligent control system for WSN and MANET / O. Lysenko, M. Sparavalo, V. Romaniuk, S. Valuiskyi. Information and Telecommunicaition Sciences, 2019. Volume 10. Number 2. P. 12–21. "Igor Sikorsky Kyiv Polytchnic Institute". ISSN 2312-4121. http://infotelesc.kpi.ua/article/view/188348

18. Integrated computer technologies in mechanical engineering. O. Lysenko, V. Romaniuk, O. Tachinina, S. Valuiskyi. Chapter: The problems of control in wireless sensor and mobile ad-hoc networks, pages 385–404. Copyright: © 2020, Publisher Springer International Publishing, DOI: 978-3-030-37618-5_33

19. Lysenko O., Tachinina O. Handbook of Research on Artificial Intelligence Applications in the Aviation and Aerospace Industries. Chapter 14. Methods for the Synthesis of Optimal Control of Deterministic Compound Dynamical Systems With Branch, p. 323–351.

20. SYNTHESIS OF DATA COLLECTION METHODS BY TELECOMMUNICATION AERIAL PLATFORMS IN WIRELESS SENSORS NETWORKS. / Anton V. Romaniuk, Valery A. Romaniuk, Myroslav Sparavalo, Olexandr I. Lysenko, Olexandr V. Zhuk. Information and telecommunication sciences. 2020. Vol. 11, no. 2.

21. Математичні моделі, методи та алгоритми оптимізації показників функціонування безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами й телекомунікаційними аероплатформами. / В.І. Новіков, О.І. Лисенко, С.В. Валуйський, О.Г. Гуйда. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського.* Серія: Технічні науки. Т. 31(70). № 3. 2020. Ч. 1. С. 54–64.

Lysenko O.I., Chumachenko S.M., Novikov V.I., Guida O.G., Tureychuk A.M., Sushyn I.O.

METHODS OF SUBSTANTIATION OF REQUIREMENTS TO WIRELESS SENSOR NETWORKS OF INFORMATION SUPPORT OF SYSTEMS OF ASSESSMENT AND FORECASTING OF THE STATE OF THE NATURAL ENVIRONMENT OF THE TERRITORIES OF DISTRIBUTED TECHNOGENIC OBJECTS

The article is devoted to the development of methodological support for improving the objectivity of ecological monitoring of terrestrial ecological systems of distributed man-made objects on the basis of integrated use of information from wireless sensor networks on monitoring biotic and abiotic factors taking into account the accumulation of pollution in the environment distributed man-made objects.

The paper specifies the stages of a complex index-bioindicator methodology, which takes into account the applied (physical) formulation of the problem of assessing and forecasting the state of the ecological system of distributed man-made objects.

The method of substantiation of requirements to wireless sensor networks of information support of systems of estimation and forecasting of a condition of a natural environment of territories of the distributed technogenic objects is offered in article points to necessity to provide use as a part of wireless sensor networks objects.

It is substantiated that the use of wireless sensor networks, the composition of sensors and their location will be selected on the basis of the proposed method, will apply the concept of index-bioindicator approach to building an integrated assessment of current and forecast environmental conditions of distributed man-made objects. the effectiveness, accuracy and reliability of these estimates and, ultimately, the sustainable development of the region of location of distributed man-made objects.

Key words: *wireless sensor network, sensor, primary information sensor, distributed man-made object, environmental monitoring.*